

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL (PRODUCTIQUE)**

**par
Pierre Paquin, ing.**

**INTÉGRATION DES CONCEPTS DE LA FIABILITÉ ET DE LA
MAINTENABILITÉ DANS LA CONCEPTION MÉCANIQUE**

JANVIER 2003

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier plus particulièrement ma conjointe Céline qui m'a permis de poursuivre ce rêve parallèlement à mes obligations familiales.

Je tiens spécialement à remercier MM. Demagna Koffi, Ph.D. et Georges Abdul-Nour, Ph.D. respectivement directeur et codirecteur de recherche de ce projet qui m'ont offert leur support et leur collaboration tout au long de mes études de maîtrise en plus de contribuer significativement au présent document par leurs commentaires lors des nombreuses discussions.

SOMMAIRE

Dans l'optique de l'amélioration de la qualité et de la productivité, la fiabilité et la maintenabilité des équipements de production sont d'une importance capitale pour une entreprise. Le contexte actuel de mondialisation accroît la concurrence, ce qui force les dirigeants à investir dans des équipements fiables et faciles à maintenir en production. Les auteurs s'entendent pour dire que les notions de fiabilité et de maintenabilité doivent être prises en compte au début du processus de conception. Ce qui justifie la mise en œuvre d'une méthodologie de développement et de conception des équipements.

La méthodologie proposée se veut une philosophie de travail plutôt qu'une recette. Sa mise en œuvre demandera une formation de l'équipe de conception afin de rendre la méthode transparente au processus normal. Certains outils d'amélioration tels que l'arbre fonctionnel, l'analyse des modes de défaillance (AMDE) et une approche comparative des composantes d'un système font partie intégrante de la méthodologie. Ces techniques devront aussi être présentées à l'équipe de conception.

La méthode proposée débute par la cueillette des données de base et la rédaction d'un cahier des charges, étape normale du processus de conception. L'accent sera mis sur la communication entre les divers intervenants et sur la mise à jour de données de base tout au long du développement de l'équipement. L'étape suivante consistera en la construction de l'arbre fonctionnel et en l'élaboration de la liste de matériel (ou des composantes). Les deux étapes précédentes permettront de bien définir les performances requises de l'équipement et des sous-systèmes en regard avec le cahier des charges.

L'analyse des modes de défaillance (AMDE) suivra afin d'identifier les failles du système et, dans la mesure du possible, de corriger les lacunes. Lorsque les budgets de construction et de conception ne sont pas illimités, ce qui est généralement le cas, des compromis de qualité d'équipement doivent être faits. C'est pourquoi l'implication du client dans le processus de conception permettra un échange d'information efficace et une validation des choix de conception faite pour rencontrer les objectifs budgétaires. L'analyse par arbre de défaillance (FTA) fournira aux gens de maintenance les informations requises à l'analyse des bris. De plus, la FTA servira de base à l'élaboration du programme de maintenance préventive. La conception se terminera par une analyse visant à assurer que l'équipement conçu répond en tous points aux exigences du cahier des charges.

L'application d'une telle méthodologie servira de cadre de conception et d'outil d'amélioration. Les exigences de tels exercices fourniront au concepteur des informations autrement inaccessibles, surtout dans le cas d'équipements conçus pour la première fois. Ces informations seront le résultat des analyses supplémentaires faites lors de la mise en oeuvre de la méthodologie.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE	II
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX	VIII
INTRODUCTION.....	1
1.1 GÉNÉRALITÉS	1
1.2 PROBLÉMATIQUE	2
1.3 BUT DE LA RECHERCHE	6
1.4 COMPOSITION DU MÉMOIRE	9
RECENSION DES ÉCRITS ET CADRE THÉORIQUE	11
2.1 L'ÉTAT DES CONNAISSANCES	11
2.2 CADRE THÉORIQUE	12
2.2.1 <i>Modèles probabilistes</i>	13
2.2.2 <i>Modèles déterministes</i>	13
2.2.3 <i>Modèles qualitatifs</i>	13
2.3 DÉFINITION DES CONCEPTS, DES TERMES ET DES PRINCIPAUX UTILISATEURS	14
2.3.1 <i>Fiabilité</i>	14
2.3.2 <i>Maintenabilité</i>	15
2.3.3 <i>Intégration des deux concepts</i>	15
2.3.4 <i>Définitions des termes</i>	15
2.3.5 <i>Phases de conception</i>	16
2.4 CONCEPTS CONNEXES	17
2.4.1 <i>Conception pour "l'utilisabilité"</i>	17
2.4.2 <i>Conception pour la fabrication</i>	18
2.4.3 <i>Conception pour l'assemblage</i>	19
2.4.4 <i>Conception pour l'essai et la maintenance</i>	21
2.4.5 <i>Conception pour l'environnement</i>	21
2.4.6 <i>Conception pour l'opération</i>	22
2.4.7 <i>Conception pour la construction</i>	24
2.5 OUTILS D'AMÉLIORATION DE LA CONCEPTION	25
2.5.1 <i>Déploiement de la fonction qualité, QFD</i>	25
2.5.2 <i>Grille d'analyse de risque (RISK)</i>	27
2.5.3 <i>Analyse des modes de défaillance, AMDE</i>	29
2.5.4 <i>Arbre de défaillance</i>	32
2.5.5 <i>Analyse sécuritaire, HAZOP</i>	35
2.5.6 <i>Chaîne de Markov</i>	36
2.5.7 <i>Analyses multicritères</i>	37
2.5.8 <i>Ingénierie simultanée</i>	40
2.5.9 <i>Méthode Taguchi</i>	41

2.6	CONCLUSION	46
MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION		47
3.1	MÉTHODE USUELLE DE TRAVAIL	47
3.2	MATRICE D'INTÉGRATION.....	49
3.2.1	<i>Matrice propre aux phases du projet.....</i>	<i>49</i>
3.2.2	<i>Matrice de relation entre les objectifs et les outils.....</i>	<i>50</i>
3.3	RÉSULTATS ATTENDUS	51
3.4	MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE.....	51
3.4.1	<i>Méthode d'analyse proposée.....</i>	<i>51</i>
3.4.2	<i>Autres facteurs influençant la conception.....</i>	<i>54</i>
3.4.3	<i>Données de base</i>	<i>55</i>
3.4.4	<i>Normalisation des composantes commerciales.....</i>	<i>55</i>
3.4.5	<i>Arbre fonctionnel.....</i>	<i>56</i>
3.4.6	<i>Liste de matériel ou liste de matériel normalisé.....</i>	<i>57</i>
3.4.7	<i>Analyse des modes de défaillance.....</i>	<i>58</i>
3.4.8	<i>Arbre de défaillance.....</i>	<i>59</i>
3.4.9	<i>Évaluation de la maintenabilité.....</i>	<i>60</i>
3.4.10	<i>Validation de la conception.....</i>	<i>61</i>
3.4.11	<i>Synthèse de la méthodologie</i>	<i>61</i>
3.4.12	<i>Mise en application de la méthode de conception.....</i>	<i>63</i>
APPLICATION.....		65
4.1	CONCEPTION DES ÉQUIPEMENTS.....	65
4.1.1	<i>Équipements de production, données de base générales.....</i>	<i>65</i>
4.1.2	<i>Qualité des composants standards.....</i>	<i>66</i>
4.1.3	<i>Éléments structuraux.....</i>	<i>67</i>
4.1.4	<i>Alimentation électrique et systèmes de contrôle.....</i>	<i>71</i>
4.2	CONVOYEUR À COURROIE	72
4.2.1	<i>Description</i>	<i>72</i>
4.2.2	<i>Conception.....</i>	<i>73</i>
4.2.3	<i>Autres facteurs influençant la conception.....</i>	<i>74</i>
4.2.4	<i>Arbre fonctionnel.....</i>	<i>77</i>
4.2.5	<i>Analyse des modes de défaillance.....</i>	<i>78</i>
4.2.6	<i>Arbre de défaillance.....</i>	<i>80</i>
4.2.7	<i>Comparaison avec les données de base et les critères de conception.....</i>	<i>83</i>
4.2.8	<i>Points faibles de l'équipement.....</i>	<i>84</i>
4.3	ANALYSE DE MAINTENANCE	84
4.3.1	<i>Méthodes d'analyse.....</i>	<i>84</i>
4.3.2	<i>Mesure de performance.....</i>	<i>86</i>
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		87
5.1	RÉCAPITULATION	87
5.2	DISCUSSION.....	88
5.3	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	89

BIBLIOGRAPHIE	91
ANNEXE I DONNÉES DE BASE.....	93
ANNEXE II NOTES DE CALCUL.....	96
ANNEXE III ARBRE FONCTIONNEL DU CONVOYEUR.....	105
ANNEXE IV ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE	112
ANNEXE V ARBRE DE DÉFAILLANCE.....	128
ANNEXE VI FIGURE ET TABLEAU	143

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Phases d'ingénierie	4
Figure 2-1 Principaux utilisateurs	8
Figure 2-2 Formulaire d'analyse de conception [1]	20
Figure 2-3 Cycle de vie environnemental	22
Figure 2-4 Éléments de support à l'opération	23
Figure 2-5 Processus d'une AMDE.....	31
Figure 2-6 AMDE, conception	32
Figure 2-7 Arbre de défaillance, système de refroidissement.....	34
Figure 2-8 Représentation des états possibles d'un système à deux composantes ...	37
Figure 2-9 Ingénierie parallèle et série [1].....	41
Figure 2-10 Fonction de perte.....	42
Figure 2-11 Taguchi, partie 1 [2].....	44
Figure 2-12 Taguchi, suite [2]	45
Figure 3-1 Organigramme de la méthode proposée.....	52
Figure 3-2 Organigramme d'implantation.....	64
Figure 4-1 Distribution de la résistance avant écoulement.....	68
Figure 4-2 Calcul du facteur de sécurité	69
Figure 4-3 Diagramme d'écoulement	76
Figure 4-4 Arbre fonctionnel, entraînement du convoyeur	77
Figure 4-5 Arbre de défaillance du convoyeur.....	81
Figure 4-6 Arbre de défaillance, lien moteur/réducteur.....	82
Figure VI-1 Maison de la qualité [7].....	144

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Phases de projet	16
Tableau 2-2 Matrice de risque [8]	27
Tableau 2-3 Gravité	28
Tableau 2-4 Probabilité associée à un risque	29
Tableau 2-5 Symboles utilisés dans la construction d'un arbre de défaillance	33
Tableau 2-6 Poids des critères	38
Tableau 2-7 Résultats de l'analyse.....	39
Tableau 3-1 Méthodologie de travail usuelle.....	48
Tableau 3-2 Relation entre la phase et les outils [8].....	49
Tableau 3-3 Outils d'amélioration [8]	50
Tableau 3-4 Résumé des orientations de conception.....	54
Tableau 3-5 Liste de pièces comparatives de paliers de roulement.....	59
Tableau 3-6 Grille d'analyse de la maintenabilité	60
Tableau 3-7 Grille de comparaison entre la méthode proposée et la méthode traditionnelle.....	62
Tableau 4-1 Critère de conception.....	73
Tableau 4-2 Facilité de maintenance	74
Tableau 4-3 Orientation de la conception	75
Tableau 4-4 Résumé de l'analyse qualitative	79
Tableau 4-5 Vérification de la conception.....	83
Tableau 4-6 Grille d'évaluation des réducteurs de vitesse	85
Tableau I-1 Formulaire de cueillette des données de base.....	94
Tableau I-2 Exemple de données de base, convoyeur à courroie	95
Tableau VI-1 Mots clés, analyse HAZOP.....	145

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 GÉNÉRALITÉS

Le présent document présente une approche intégrée et systémique visant à fournir les informations nécessaires aux concepteurs d'équipements de production manufacturière désirant améliorer la fiabilité et la maintenabilité de leurs produits. N'ayant pas la prétention de remplacer les pratiques éprouvées de conception, la méthodologie proposée se voit plutôt comme un aide-mémoire et une démarche d'analyse. Dans un premier temps, la problématique associée à ce travail sera identifiée pour ensuite présenter la méthodologie de recherche utilisée. Les diverses orientations utilisées en conception seront ensuite définies. Suivra une liste d'outils éprouvés.

La présente recherche fut réalisée parallèlement à la conception d'équipements de production destinés à l'usine Alcan de Shawinigan. La firme d'ingénierie Consultants Mesar inc. avait été mandatée pour réaliser la conception de ces équipements. Bien que la méthode n'ait pas été mise à l'essai lors de ces projets, son développement fut inspiré des problèmes rencontrés lors de la conception et de la mise en opération de ces équipements. De plus, la raison de mon intérêt pour l'amélioration de la conception d'équipements de production origine des mandats réalisés pour l'Aluminerie Luralco alors que l'auteur était à l'emploi de la firme de Consultants VFP de Trois-Rivières.

1.2 PROBLÉMATIQUE

Lors de la conception d'équipements de production sur mesure, l'expérience a démontré qu'il subsistait certaines questions omniprésentes dans l'esprit des concepteurs telles que :

- La conception est-elle optimale?
- Le niveau de maintenance est-il trop élevé?
- La disponibilité des équipements est-elle adéquate?
- L'opération est-elle sécuritaire pour les opérateurs, les employés de maintenance, etc., ou pour l'environnement?

De plus, les clients demandant de concevoir des équipements de production s'attendent à en tirer le maximum, soit de produire un bien de qualité, avec un taux de production maximum, avec des coûts de production minimum et de rentabiliser leur investissement le plus rapidement possible.

La notion de disponibilité prend alors son importance. Rappelons que la disponibilité se définit comme suit [14]:

$$A = \text{MTTF} / (\text{MTTF} + \text{MTTR})$$

$$A = \text{disponibilité (« availability »)}$$

$$\text{MTTF} = \text{temps moyen entre deux pannes (« mean time to failure »)}$$

$$\text{MTTR} = \text{temps moyen de réparation (« mean time to repair »)}$$

Dans le concept de disponibilité, le premier constituant est le MTTF qui donne son sens à la fiabilité des équipements. Un équipement non fiable générera des arrêts fréquents de production ayant pour effet de réduire la disponibilité et la productivité.

Le second constituant est le MTTR qui donne le sens à l'implication de la maintenabilité des équipements. Une mauvaise conception de l'équipement, du point de vue maintenance, aura pour effet d'augmenter le temps requis pour en faire l'entretien, donc diminuera la disponibilité. Une méthode de conception ayant pour but l'optimisation de la disponibilité devra obligatoirement inclure les concepts de fiabilité et de maintenabilité.

Les équipements conçus sont mis en production et à moins qu'ils ne rencontrent pas les performances préétablies, la firme d'ingénierie n'aura pas de feed-back sur la conception des équipements. Alors comment inclure les concepts de fiabilité et de maintenabilité qui se basent sur la probabilité de pannes et demandent un suivi des équipements? Existe-t-il des bases de données économiquement et techniquement utilisables pour la conception? Les firmes ne disposent pas de registre ou de base de données mis à jour au fur et à mesure que les projets se succèdent. Lors du départ d'un employé, son expérience et ses connaissances pratiques s'envolent. Alors comment maintenir à jour une source d'information efficiente?

D'une firme à l'autre, la méthode de conception est essentiellement la même, l'organigramme (figure 1-1) présente la phase A, l'étude de concept avec ses principales étapes. L'identification de la problématique n'inclut pas la détermination systématique des critères d'évaluation des solutions, ni même l'évaluation des solutions en regard de ces critères. La comparaison se fait intuitivement selon les préférences du ou des concepteurs et le principal élément de comparaison est la fonctionnalité. Cette étape manquante dans le processus de l'ingénierie (élaboration de critères de conception) est un élément de la problématique. Implicitement, les concepteurs analysent diverses alternatives et les évaluent sans pour autant avoir déterminé clairement les critères d'évaluation. Régulièrement, les critères sont transmis verbalement et de manière informelle. Quoique la rédaction des critères par le consultant puisse être un excellent outil de communication autant à l'interne qu'à l'externe, cette habitude n'est pas ancrée dans les mœurs.

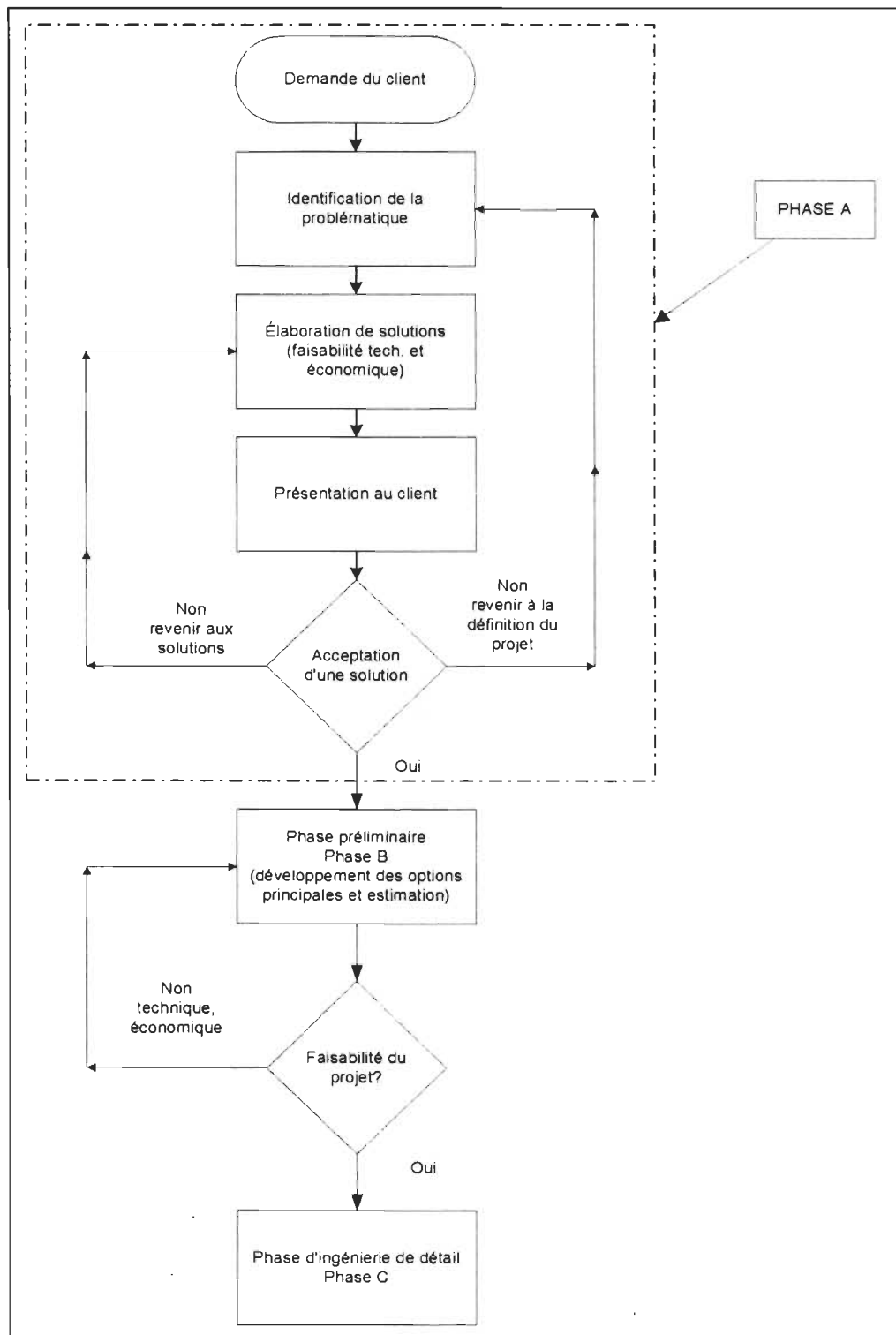


Figure 1-1 Phases d'ingénierie

La complexité de la conception ou de l'équipement exige une méthodologie simple et efficace pour ne pas alourdir indûment le processus et augmenter les coûts de développement. Qui paye pour l'optimisation? Lors de la construction d'une nouvelle usine, la phase de construction proprement dite était sous la responsabilité d'un groupe spécialisé pour ce travail et relevant du siège social. Par contre, l'opération relevait d'un tout autre groupe. La communication entre les groupes s'est avérée difficile due aux objectifs divergents des deux groupes. La question demeure entière. La communication entre les diverses fonctions de l'entreprise du client est souvent un obstacle à l'optimisation. En effet, les gens de projet désirent un projet à meilleur coût possible et dans les meilleurs délais sans mettre l'accent sur les coûts de maintenance et d'opération. L'opération vise plutôt une fiabilité de 1, sans arrêt de maintenance et la maintenance partage la vision de l'opération qui demande zéro maintenance. Quoique utopique, cette vision répond à une loi, celle de la gravité, dans ce cas, celle du moindre effort. Bien sûr ce concept est extrémiste, mais il traduit bien le besoin d'optimisation, soit de produire à meilleur coût possible avec un minimum d'arrêt.

Lors de la conception, les coûts d'entretien et d'opération ne sont pas connus ou sont mal identifiés. Certaines modifications de concept faciliteront la maintenance, mais seront un irritant pour l'opération, et vice-versa. Une analyse précoce permettra de bien balancer le développement de l'équipement et fournira un bon équilibre entre les coûts d'acquisition de l'équipement et les coûts d'opération et de maintenance. De plus, à cette étape, les données pertinentes sur le comportement de l'équipement en cours de développement ne sont pas connues d'autant plus que dans bien des cas, l'équipement n'existe pas, donc il n'y a pas d'historique ou que les données nécessaires à l'analyse sont confidentielles. Puisque la fiabilité et la maintenabilité sont des distributions de probabilité, le concepteur aura la tâche de trouver ces informations concernant la disponibilité de l'équipement afin d'être en mesure de procéder à l'analyse de son concept.

Un autre élément de la problématique réside dans la méthode même des concepteurs qui s'attaquent très rapidement à des éléments spécifiques de l'équipement sans prendre de recul pour avoir une vision systémique du produit en conception. La vision systémique permettra d'intégrer l'ensemble des fonctions de l'équipement dans un tout que l'on nomme ligne de production (voir même une usine); cette approche se veut de type « *top-bottom* ».

1.3 BUT DE LA RECHERCHE

Le but de cette recherche est de fournir un outil de travail efficient intégrant les concepts de fiabilité et de maintenabilité. Le chemin pour l'amélioration de la fiabilité (et, par extension, pour la maintenabilité) n'est pas simplement l'utilisation de composantes surdimensionnées ou l'utilisation des composantes coûteuses mais plutôt une méthode partant de la définition même du produit et du suivi en phase de fabrication et d'opération [17]. Cette recherche fournira des informations sur les sources de bris afin de prévenir la rupture en condition d'opération. Un ingénieur expérimenté vérifiera les mécanismes de défaillance déjà rencontrés tandis que le meilleur ingénieur anticipe les bris et tente de les prévenir [16].

Afin de rencontrer ce but, les objectifs spécifiques suivants devront être rencontrés :

- ✓ Analyser les diverses orientations de la conception et en définir les particularités;
- ✓ Analyser les divers outils d'amélioration de la fiabilité et de la maintenabilité applicables à la conception d'équipements de production et les présenter sous forme de tableau récapitulatif;
- ✓ Modéliser l'équipement de production en regard à ses éléments principaux (éléments de transmission de puissance, éléments de contrôle, éléments structuraux, etc.);
- ✓ Construire une grille d'aide à la conception afin d'introduire les notions de fiabilité à tous les niveaux de la conception;

- ✓ Construire une grille d'aide à la conception afin d'introduire les notions de maintenabilité à tous les niveaux de la conception;
- ✓ Développer une méthodologie de conception systémique tenant compte de la fiabilité et de la maintenabilité;
- ✓ Et dans une autre étape, développer un logiciel intégrant les notions ci-dessus ayant pour but de fournir aux concepteurs des données préliminaires sur la fiabilité de leur conception.

Suite à l'utilisation des outils décrits ci-dessus, le concepteur sera en mesure d'identifier l'influence des divers éléments constituant l'équipement sur l'unité de production tout entière. Il pourra réaliser des simulations visant à évaluer les solutions possibles.

Les résultats de la méthodologie sur un projet particulier n'auront pas de signification statistique autre que prévisionnelle. La nature même du champ d'application de la recherche rend difficile la cueillette de données car les résultats de l'application de la méthodologie ne seront mesurés qu'après la mise en opération et l'utilisation des équipements.

La méthodologie sera plus adaptée à la conception d'équipement de production sur mesure. La particularité de ce domaine est la faible répétabilité des concepts et le ratio coût/fiabilité. Un équipement conçu pour une production particulière ne pourra pas être utilisé pour un autre produit. Dans plusieurs cas, même si à première vue les équipements semblent identiques, des particularités propres à la production ou aux méthodes justifieront des modifications majeures à un équipement pour l'adapter à un autre type de production.

Cette recherche s'adresse principalement aux concepteurs d'équipements de production et aux gens de maintenance. Cette conception peut se faire selon deux méthodes différentes, la figure 1-2 présente ces méthodes. La première implique que le développement soit fait par un fabricant spécialisé possédant sa propre équipe d'ingénierie et ses ateliers de fabrication. L'équipe d'ingénierie aura donc accès

facilement aux données historiques de l'entreprise et aux ateliers. Une solution donnée pourra être commentée par les gens de production sur-le-champ.

L'autre méthode consiste à confier la conception à une firme de consultants et la fabrication à divers entrepreneurs spécialisés. Dans ce cas, la firme ne dispose pas d'atelier de fabrication ni de banc d'essai. L'accès au personnel de fabrication est aussi limité.

Dans les deux cas, la méthodologie proposée sera applicable avec un minimum de modifications par l'utilisateur. Une méthode d'intégration sera ainsi développée pour des firmes de consultants externes.

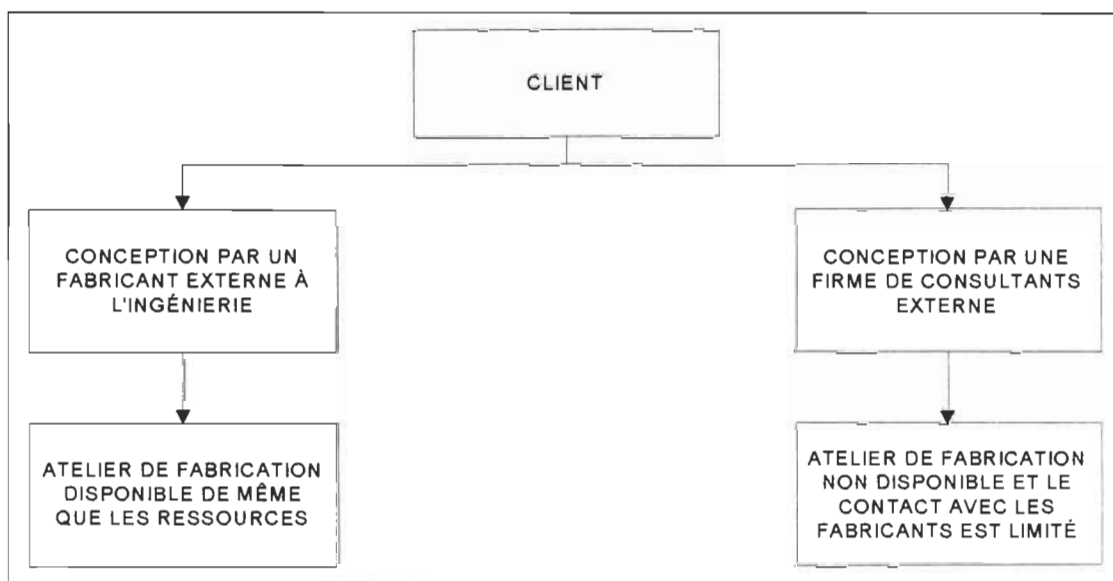


Figure 1-2 Principaux utilisateurs

1.4 COMPOSITION DU MÉMOIRE

Le mémoire se subdivise en quatre parties. La partie 1 introduit le projet et présente la problématique, de l'intégration des concepts de la fiabilité et de la maintenabilité dans la conception mécanique. La partie 2 (recension des écrits et cadre théorique) aura pour objectif de bien identifier les outils et les divers objectifs de conception. Les activités suivantes seront incluses dans cette première partie :

- ❑ Recherche d'information technique sur le sujet, recension des écrits;
- ❑ Définition des termes;
- ❑ Identification et définition des divers objectifs de conception;
- ❑ Identification et définition des divers outils d'amélioration de la conception;
- ❑ Élaboration d'une matrice faisant le lien entre les objectifs et les outils;
- ❑ Limite de la recherche.

La partie 3 (méthodologie) aura pour objectif de proposer une méthodologie de conception. Les activités suivantes feront partie de cette étape :

- ❑ Sélection des outils d'amélioration de la fiabilité et de la maintenabilité parmi les outils précédemment identifiés;
- ❑ Comparaison entre la méthode proposée et la méthode utilisée dans la conception classique d'équipement de production;
- ❑ Élaboration d'une stratégie d'intégration dans une firme de consultants;
- ❑ Discussion sur la méthodologie proprement dite.

La partie 4 (application) de la recherche touchera l'application systématique de la méthodologie présentée à la partie 3 sur un exemple concret de conception. Pour ce faire, les activités suivantes seront réalisées. L'ordre de présentation ne reflète pas nécessairement l'ordre chronologique de réalisation.

- ❑ Sélection d'un exemple de conception;
- ❑ Identification des bases de données génériques;
- ❑ Collecte de données auprès des manufacturiers de composants standards;
- ❑ Compilation des données et sélection des informations pertinentes;
- ❑ Application de la méthodologie;
- ❑ Discussion.

CHAPITRE II

RECENSION DES ÉCRITS ET CADRE THÉORIQUE

Afin de bien se situer dans l'environnement de la fiabilité et de la maintenabilité, la section suivante fera un survol de l'état des connaissances dans le domaine. Suivra ensuite une introduction aux divers modèles mathématiques utilisés en fiabilité, pour terminer avec une présentation des concepts connexes ayant un intérêt pour le domaine de la conception.

2.1 L'ÉTAT DES CONNAISSANCES

La fiabilité est une notion largement utilisée dans les domaines militaires et nucléaire étant donné la criticité d'une défaillance [4]. L'amélioration de la fiabilité est traitée soit comme une approche systémique d'amélioration de la productivité de l'entreprise tout entière [13] ou soit comme une analyse des éléments constituant des équipements [4]. Dans ce domaine la NASA a mis au point un guide de référence (appelé « *toolbox* ») pour l'amélioration de la conception [8]. Ce document regroupe l'ensemble des techniques connues d'étude et d'analyse d'un produit ou d'un composant en vue de son amélioration. Bien que complet, ce document n'intègre pas plusieurs techniques dans un même processus d'analyse.

La maintenabilité, tout comme la fiabilité, est une notion largement utilisée dans les domaines militaire [19], aéronautique, industrie automobile et nucléaire étant donné les coûts des équipements et le temps de remplacement qui deviennent déterminants dans un contexte de confrontation armée ou lors de l'opération d'une centrale nucléaire. Il va de soi que dans un contexte critique, le temps de remplacement d'une composante peut faire la différence entre une victoire ou une défaite, ou entre une opération sécuritaire et une catastrophe nucléaire. Les cas à l'étude ne sont pas aussi extrêmes; cependant, la rentabilité de l'entreprise peut en être affectée.

Une entreprise de classe mondiale emploie un professionnel en maintenabilité pour s'impliquer très tôt dans un projet [9]. Le but de la présente recherche se voit plutôt une intégration des notions de maintenabilité par les concepteurs, non pas dans le but d'éviter une vérification externe, mais pour intégrer les concepts de base de maintenabilité dans l'esprit même des concepteurs.

Bien que les outils d'amélioration de la conception existent, à la lumière des lectures effectuées, aucun auteur n'a traité d'une méthodologie d'intégration des concepts de la fiabilité et de la maintenabilité propre à la conception des équipements de production dédiés, c'est-à-dire des biens sur mesure avec peu ou pas de répétition. Dans bien des cas, les techniques d'amélioration décrites s'appliquent à des équipements de production en opération, ce qui est le cas avec les notions de maintenance basée sur la fiabilité.

2.2 CADRE THÉORIQUE

Suite à la lecture de nombreux articles et autres documents pertinents, il ressort que certaines précisions seront utiles au déroulement de la recherche. Discuterons des divers modèles mathématiques et définissons les concepts utiles. Suivra une présentation des diverses orientations de conception. Selon le but du concepteur d'équipement, certains aspects de la machine devront être plus approfondis.

Lors des recherches pour modéliser mathématiquement un équipement ou un concept, plusieurs types de modèles mathématiques se sont présentés. Ils peuvent être regroupés suivant trois groupes distincts, soit les modèles probabilistes, les modèles déterministes et les modèles qualitatifs.

2.2.1 Modèles probabilistes

L'élaboration et l'utilisation des théories relatives à la fiabilité nécessitent l'utilisation de notions statistiques et de modèles de distribution comme la loi normale, log-normale, binomiale, de Poisson ou Weibull. Les ouvrages spécialisés en fiabilité [14] traitent des principaux modèles. Le modèle développé dans cette recherche intégrera ces notions statistiques dans la mesure de la disponibilité de l'information.

2.2.2 Modèles déterministes

Les principales théories utilisées sont connues et appartiennent aux domaines de la résistance des matériaux et de l'écoulement des fluides. De plus, les données empiriques et les méthodes de conception des manufacturiers de composants standards seront prises en compte dans l'élaboration de la méthodologie. Sans pour autant faire une recherche exhaustive sur les diverses méthodes de conception relevant plus du génie mécanique ou électrique, la méthodologie proposée tentera de fournir les outils nécessaires afin d'imbriquer les notions de fiabilité et de maintenabilité aux techniques usuelles utilisées lors de la conception des équipements de production.

2.2.3 Modèles qualitatifs

Dans certains cas, les données ne sont pas disponibles et l'application de modèles mathématiques n'est pas possible. Pour ce faire, certains outils permettront de traduire des données qualitatives en valeurs numériques basées sur des analyses comparatives. L'analyse multicritère, traitée ci-dessous, utilise cette procédure.

2.3 DÉFINITION DES CONCEPTS, DES TERMES ET DES PRINCIPAUX UTILISATEURS

Les sections suivantes serviront à présenter les principaux concepts utiles à l'élaboration d'une méthodologie de conception. De plus, la définition des termes et la nomenclature des principaux utilisateurs permettront de délimiter le champ d'application de la méthodologie.

2.3.1 Fiabilité

Dans le cadre de la présente recherche, nous traiterons principalement de fiabilité prévisionnelle obtenue à partir d'un modèle mathématique basé sur la fiabilité estimée des composants standards. Suite à l'application de la méthode, le concepteur enrichira la base de données de la firme, ce qui permettra de réutiliser les modèles développés des équipements ou des sous-ensembles similaires et déjà mis en opération.

La fiabilité est la probabilité prévisionnelle qu'un équipement demeure en production sans arrêt causé par des bris selon une durée de vie préétablie, dans les limites intrinsèques de l'équipement, soit dans les limites des performances de conception. Ainsi, un équipement sera fiable si, dans le cadre de l'opération normale, il survit à un temps déterminé sans panne.

La panne se définira comme étant un écart négatif du comportement de l'équipement avec les critères de conception en regard aux critères suivants :

- La capacité de production;
- La sécurité opérationnelle;
- La sécurité de la fonction de maintenance;
- L'ergonomie;
- L'environnement;
- La qualité et les coûts d'opération.

2.3.2 Maintenabilité

La maintenabilité est une caractéristique propre au design de l'équipement. Elle détermine la facilité, la précision, la sécurité et l'économie dans l'exécution de la fonction de la maintenance. [1]

La maintenabilité est une caractéristique de la conception et de l'installation exprimée selon une probabilité que l'équipement soit remis en état ou maintenu en production, et ce, selon les performances spécifiées à l'intérieur d'une période de temps donnée lorsque la fonction de maintenance est exécutée suivant les procédures prescrites et avec les ressources recommandées par le manufacturier. [15]

Dans la présente recherche, la maintenabilité sera définie comme la probabilité prévisionnelle qu'un équipement soit remis en opération suivant un programme d'entretien systématique dans le cadre des limites intrinsèques de production de l'équipement.

2.3.3 Intégration des deux concepts

La juxtaposition des concepts de la fiabilité et de la maintenabilité se fait naturellement par la définition de la disponibilité des équipements présentée ci-dessus. Le but de la mise en commun de deux concepts sera d'optimiser la disponibilité prévisionnelle par l'augmentation de la fiabilité et par la diminution du temps de remise en opération (MTTR).

2.3.4 Définitions des termes

Définitions des termes généraux :

« *Top-bottom* » : Une approche de type « *top-bottom* » se définit comme une approche débutant par l'analyse du système en entier pour ensuite s'attarder au constituant de ce système.

« *Bottom-up* » : Une approche de type « *bottom-up* » se définit comme étant une approche débutant par l'analyse de composantes spécifiques d'un système pour ensuite déterminer son influence sur le système.

Composante standard : Une composante standard est un élément de machine que l'on retrouve dans les catalogues des divers fournisseurs et fabricants. Cette composante est produite en série et est d'usage général. L'on retrouve entre autres des roulements, des courroies d'entraînement, des réducteurs de vitesse, des vannes directionnelles hydrauliques, etc.

Les manufacturiers de composants standards tels que EPT, Browning, Tsubaki, Dodge, Boston Gear, etc., disposent de modèles empiriques et théoriques pour la sélection des composantes.

2.3.5 Phases de conception

Les phases du projet seront définies au tableau 2-1 ci-dessous. Ces informations sont requises afin de bien comprendre le niveau de conception auquel l'intégration doit se faire [10].

Tableau 2-1 Phases de projet

PHASE	DESCRIPTION
Phase A	Étude de concept, choix d'une technologie, étude comparative
Phase B	Ingénierie préliminaire, élaboration de la meilleure alternative et estimation des coûts du projet
Phase C	Ingénierie de détails, élaboration des plans et devis
Phase D	Fabrication (incluant les essais) et installation
Phase E	Mise en opération, livraison de l'équipement

2.4 CONCEPTS CONNEXES

La présentation des concepts connexes vise à conscientiser le concepteur aux diverses orientations possibles. La technique de conception idéale utiliserait chacune de ces orientations en parallèle dans le processus de développement d'un produit ou d'un équipement. Quoique utopique, l'équipe de travail devrait garder en tête les points principaux découlant des objectifs présentés ci-dessous.

2.4.1 Conception pour "l'utilisabilité"

« *Design for usability (human factor)* »

La conception pour l'utilisabilité présente des similitudes dans la philosophie d'application de la méthode. À l'étape d'élaboration du concept, les gens impliqués doivent déjà penser sécurité pour l'opération et l'entretien des équipements. De plus, cette orientation fait intervenir la notion d'ergonomie. Dans le processus de conception, différents autres facteurs devraient être pris en compte soit :

- Les données anthropométriques;
- Les facteurs sensitifs (ventilation, chauffage, éclairage, etc.);
- Les facteurs physiologiques (impact des forces environnantes);
- Les facteurs psychologiques (attentes, attitudes, motivation, etc.);
- Et l'interrelation entre ces éléments.

Une des prémices de-base serait de concevoir les équipements en fonction des opérateurs et des gens de maintenance et non d'adapter les personnes aux équipements.

L'approche traditionnelle de conception se compose de deux grandes étapes, la conception proprement dite et la revue de conception par un groupe de spécialistes en sécurité [3], d'où l'appellation de conception en série. L'approche favorisée dans cette recherche en sera plutôt une dite parallèle ou intégrée. Un des objectifs de concevoir

suivant une approche intégrée est de capitaliser sur le niveau de connaissance que possèdent les concepteurs sur le produit en développement. Aucun vérificateur externe ne sera en mesure d'avoir le même niveau de connaissance du produit que le concepteur et bien qu'une vérification externe soit valable, la mise en place de méthodes intégrées présente une économie de temps et d'argent [3].

2.4.2 Conception pour la fabrication

« *Design for manufacturing* (DFM) »

La conception pour la fabrication pourrait être nommée la conception pour la fabrication des composantes. L'élément clé de ce principe est la composante même. Le DFM s'attarde surtout à la méthode de fabrication ou au procédé de fabrication des composantes proprement dites. Par exemple, prenons une attache de vérin hydraulique, cette composante peut être fabriquée par un procédé mécano-soudé puis usinée, ou bien coulée et usinée. Le concepteur doit se poser comme question quel sera le meilleur procédé de fabrication en fonction des propriétés mécaniques désirées, du nombre de pièces et du temps de fabrication. Il devra aussi vérifier la faisabilité de réalisation de la composante.

Lors de la conception, il est impératif de prendre en compte la méthodologie de fabrication des composantes. Les questions suivantes peuvent faire partie d'une liste de vérification de la conception d'un assemblage mécano-soudé :

- ✓ La méthode d'assemblage va-t-elle permettre de rencontrer les tolérances dimensionnelles?
- ✓ Lorsque requis, l'usinage est-il possible?
- ✓ Doit-on couler des pièces spécifiques?
- ✓ Un recuit de détente est-il requis?
- ✓ Doit-on recouvrir l'équipement d'une protection contre la corrosion?
- ✓ Les matériaux utilisés sont-ils compatibles entre eux?

2.4.3 Conception pour l'assemblage

« *Design for assembly* (DFA) »

La conception pour l'assemblage s'attaque à l'agencement des pièces les unes par rapport aux autres. La DFA se voit comme une mesure de la capacité d'assemblage des composantes. La figure 3 présente un outil de mesure de la capacité d'assemblage.

À l'étape de la conception préliminaire, la DFA mesurera la facilité d'assemblage des différentes alternatives proposées. Ainsi, la grille ci-dessus, figure 2-1, servira d'outil de mesure. Les éléments d'analyse seront le nombre de pièces, le stockage, la manutention, l'alignement et la mise en place des composantes constituant l'assemblage.

Ce concept, la DFA, se voit comme un outil de conception bien adapté à la fabrication en grande série. Lors de la fabrication d'un produit unitaire, le concepteur intégrera certains aspects de la DFA. Le point important à retenir de cette orientation est le niveau qualitatif de l'analyse. L'utilisation de grilles d'évaluation permettra de comparer diverses propositions entre elles.

CONCEPTION POUR L'ASSEMBLAGE							
BUT DE L'ANALYSE :							
Évaluée par					Date		
Vérifiée par					Date		
Essai	1	2	3	4	5		
Assemblage principal							Notes
Nombre de composantes	Faible	Moyen		Bon	Très bon	Excellent	
Utilisation minimale des attaches rapides "fastners"	Faible	Moyen		Bon	Très bon	Excellent	
Gabarit d'assemblage, plaque de base (surfaces ou trous de positionnement)	Faible	Moyen		Bon	Très bon	Excellent	
Nombre de repositionnements durant la séquence	2 ou +			1		0	
Efficacité de la séquence d'assemblage	Faible	Moyen		Bon	Très bon	Excellent	

Manutention des composants avant assemblage						
Caractéristiques qui complique la manutention des composants	Aucune	Peu		Quelques	La majorité	Toutes
Conception pièces pour l'utilisation avec des équip. automatisés (vrac, bande, magasin)	Aucune	Peu		Quelques	La majorité	Toutes
Manutention des composants durant assemblage						
Pièces avec axe de symétrie	Aucune	Peu		Quelques	La majorité	Toutes
Pièces avec axe de symétrie par rapport à l'axe d'insertion	Aucune	Peu		Quelques	La majorité	Toutes
Pièce avec symétrie non possible Pièce asymétrique	Aucune	Peu		Quelques	La majorité	Toutes
Part mating						
Straight line motions of assembly	Aucune	Peu		Quelques	La majorité	Toutes
Chanfreins ou configuration d'auto alignement	Aucune	Peu		Quelques	La majorité	Toutes
Accessibilité maximale	Aucune	Peu		Quelques	La majorité	Toutes
						Résultats
						Total x 8
					Total x 6	
				Total x 4		
			Total x 2			
		Total x 0				
Remarque	Évaluation pour fins de comparaison entre deux ou plusieurs configurations					

Figure 2-1 Formulaire d'analyse de conception [1]

2.4.4 Conception pour l'essai et la maintenance

« *Design for test and maintenance (DFTM)* »

La conception pour l'essai et la maintenance s'oriente vers la mesure de la facilité à vérifier les performances des fonctions critiques des équipements et la facilité à maintenir en opération cet équipement. Le concept de maintenance sera intégré dans le concept de maintenabilité et traité plus à fond dans ce mémoire. Notons cependant que ce concept traite de l'ajout de composantes ou de certaines facilités aidant à la maintenance.

La conception pour l'essai vise à faciliter la mesure des performances critiques des produits. Ce concept est facilement applicable dans la fabrication de composantes électroniques. Par contre, l'ajout de structures pour faciliter l'essai est souvent difficile pour une pièce mécanique [13, p. 279].

2.4.5 Conception pour l'environnement

« *Design for environment* »

La conception pour l'environnement ou « green design » vise à minimiser les risques environnementaux. Cette technique de conception englobe les notions suivantes :

- Conception en fonction du cycle de vie;
- Conception en fonction du recyclage, s'assurer que les constituants entrant dans la fabrication d'un produit donné sont recyclables;
- Dommage à l'environnement, analyser les impacts environnementaux possibles du produit durant les diverses étapes de son cycle de vie. Que ce soit durant la fabrication, durant la mise en service ou à tout autre moment, le produit ne doit pas provoquer de dommages environnementaux.

La figure 2-2 présente le cycle de vie environnemental d'un produit. Lors de la conception, le concepteur analysera le produit en fonction des diverses étapes du cycle de

vie du produit et comparera les options entre elles pour sélectionner la moins pire des solutions.

Ces concepts seront de plus en plus intégrés au processus de conception suite à des pressions de la population, des groupes de protection de l'environnement, des attentes des clients et de la réglementation en vigueur [13, p. 279, 280].

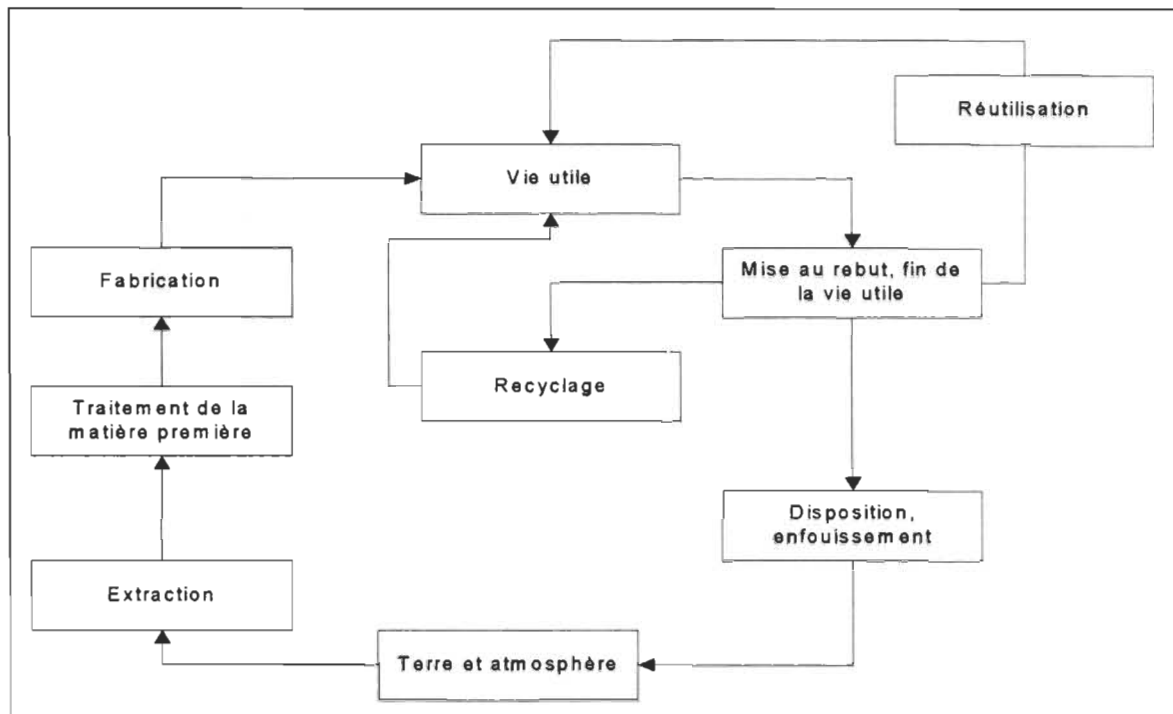


Figure 2-2 Cycle de vie environnemental

2.4.6 Conception pour l'opération

« *Design for serviceability or supportability* (DFS) »

La conception pour l'opération est une caractéristique de la conception ayant pour but de faciliter et de permettre la maintenance et l'opération efficaces de l'équipement durant sa durée de vie. L'objection du concept DFS n'est pas seulement l'incorporation des concepts de fiabilité et de maintenabilité mais aussi l'analyse et la prise en compte des infrastructures opérationnelles des équipements. La DFS vise à analyser l'équipement

dans son environnement afin de s'assurer que celui-ci soit en mesure d'offrir la meilleure disponibilité possible. Par exemple, l'implantation d'un automate programmable dans une entreprise nécessite une formation des employés d'opération et de maintenance, un ajustement des pièces en inventaire, etc., afin de permettre l'opération de l'équipement. La DFS se voit comme une revue de conception et une orientation primaire d'intégration de l'équipement dans son milieu d'opération. Les éléments de support d'un équipement sont présentés à la figure 2-3.

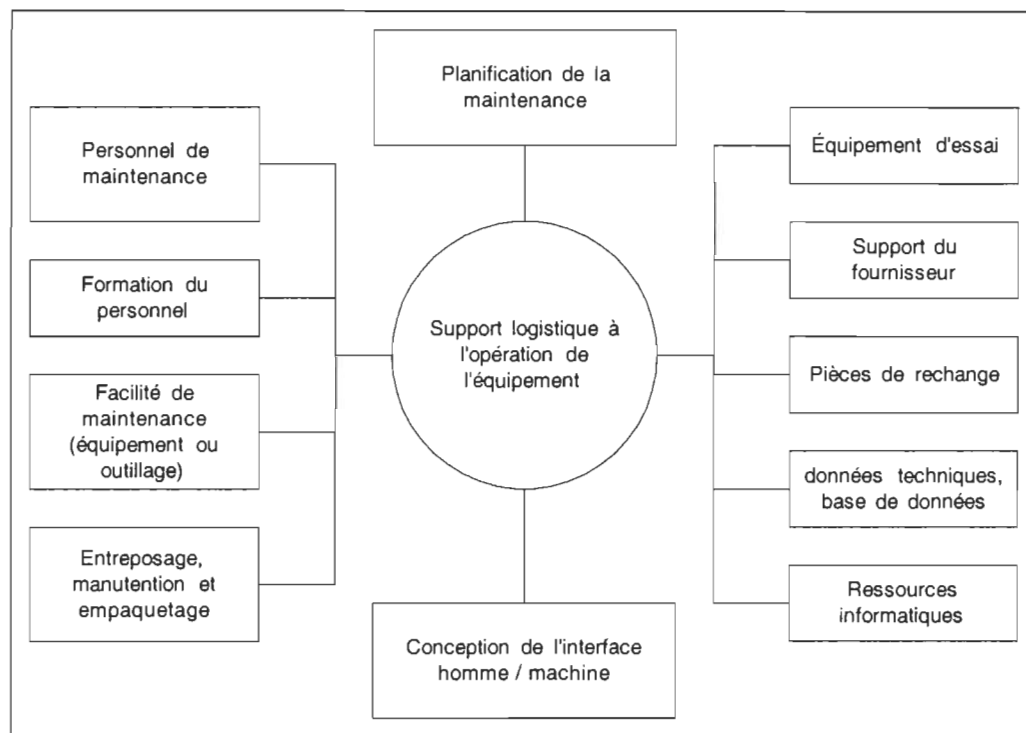


Figure 2-3 Éléments de support à l'opération

La DFS aura avantage à être intégrée très tôt dans le processus de conception afin d'éviter des erreurs coûteuses telles que le réaménagement d'une salle de mécanique puisque la maintenance y est impossible. Le fait de ne pas tenir compte des éléments de support présentés ci-dessus aura une incidence directe sur les coûts d'opération et de maintenance. L'analyse doit se faire très tôt dans le processus puisque l'on évalue les diverses options présentées lors de la phase B (préliminaire).

2.4.7 Conception pour la construction

« *Design for constructability* »

La conception pour la construction, tout comme la conception pour la sécurité, rejoint le sens de cette recherche par l'avantage d'introduire les principes d'intégration de la « *constructability* » au tout début de la phase de concept. La revue de conception pour la construction doit être un élément du processus de conception [11] tout comme c'est le cas pour la fiabilité et la maintenabilité.

La conception pour la construction, comme son nom l'indique, vise des projets de construction tels que la mise en place de nouvelles machines et la construction d'une nouvelle usine. Ce concept suggère d'introduire, dès le début d'un projet, les sujets d'analyse propres à la construction tels que présentés ci-dessous :

- Lot de construction et phase du projet. Le regroupement de travaux peut être une source d'économie importante lors de la réalisation et permet de mieux gérer le chantier;
- Séquence de construction, ordonnancement des travaux incluant la faisabilité de la construction;
- Analyse de l'ingénierie de détail en fonction de la réalisation sur le chantier;
- Sélection des sous-systèmes;
- Sécurité de chantier reliée à la technique de construction;
- Analyse des contrats de construction en fonction des lots et des phases;
- Mise en service des nouveaux équipements;
- Transfert des équipements après la construction incluant le transfert de connaissance entre les gens de mise en service et les gens d'opération;
- Formation des opérateurs et des gens de maintenance.

Chacun des éléments mentionnés ci-dessus s'intègre dans une méthodologie de revue de conception et dans la mise en place de techniques de formation et d'information des concepteurs en regard de ces notions.

2.5 OUTILS D'AMÉLIORATION DE LA CONCEPTION

Cette section dresse une liste sommaire des divers outils d'amélioration de la conception. Ces outils serviront de toile de fond à la méthodologie d'analyse proprement dite. Bien que tous les outils ne soient pas repris dans la méthodologie, leur présentation permet de bien voir la philosophie sous-jacente, soit l'amélioration de la qualité en général.

De plus, l'étude des divers outils a permis de développer des matrices d'intégration servant de guide de conception. Ainsi, il sera possible de trouver, via les matrices d'intégration, une autre démarche de conception pour s'adapter à une situation particulière. Les outils d'analyse sont bien connus et fortement documentés. De plus, un bref survol des outils d'amélioration ayant retenu l'attention lors de cette recherche sera fait.

2.5.1 Déploiement de la fonction qualité, QFD

QFD, « *Quality Function deployment* » ou déploiement de la fonction qualité. Cet outil vise à traduire les besoins et les attentes des clients (« *what* », les "quoi") en terme de critères de conception pour ensuite développer un plan qualité en vue de la production d'un produit fini par un déploiement systématique des relations entre les demandes des clients et les critères de conception [18]. La satisfaction d'un client ne peut s'accroître que si le fournisseur de bien ou de service écoute et réagit aux demandes de ce client [5].

Les objectifs de la QFD sont l'amélioration de la qualité, l'augmentation de la satisfaction des clients, l'amélioration des performances de l'entreprise, la diminution du temps de conception, la diminution des coûts de conception et de fabrication, la réduction des changements de conception et l'amélioration de la fiabilité [7].

Un support de la QFD est la maison de la qualité (« *house of quality* », HOQ). La HOQ est une matrice servant à faire ressortir les relations entre les besoins et les attentes des clients et les différents designs ou éléments de design d'un produit. De plus la HOQ fait ressortir les relations entre les éléments du design eux-mêmes. La figure 1 à l'annexe VI présente la maison de la qualité.

Les étapes de construction de la maison de la qualité sont les suivantes :

- ❑ Connaître les besoins des clients, qu'est-ce que les clients désirent? (« *what* » ou quoi, plan qualité);
- ❑ Classer les besoins par ordre d'importance;
- ❑ Déterminer comment on peut répondre aux besoins (« *how* » ou comment). Identification ou détermination des éléments de base de la conception pouvant répondre aux attentes et aux besoins des clients;
- ❑ Quantifier les relations entre les "comment" et les "quoi" dans la matrice d'interrelation;
- ❑ Quantifier les interrelations entre les "comment" eux-mêmes dans la section supérieure de la maison de la qualité;
- ❑ Introduire, si possible, une étude comparative avec les autres fournisseurs, « *benchmarking* ».

2.5.2 Grille d'analyse de risque (RISK)

La grille d'analyse de risque (RISK) est un outil servant à évaluer le risque en fonction de la probabilité et de la gravité [8]. Pour un événement donné, le niveau de risque sera déterminé par le produit de la sévérité par la probabilité. Ce produit peut aussi être représenté par une matrice. Le tableau 2-2 ci-dessous présente cette matrice.

Tableau 2-2 Matrice de risque [8]

GRAVITÉ	PROBABILITÉ					
	F IMPOSSIBLE	E IMPROBABLE	D RARE	C OCCASIONNEL	B PROBABLE	A FRÉQUENT
I CATASTROPHIQUE	3	3	2	1	1	1
II CRITIQUE	3	3	3	2	1	1
III PEU IMPORTANT	3	3	3	3	2	2
IV NÉGLIGEABLE	3	3	3	3	3	3
Code de risque	Action					
1	Ce risque doit être réduit à un niveau inférieur, non acceptable					
2	Cette opération requiert une procédure écrite et une autorisation d'un supérieur.					
3	Opération permise.					
NOTE :	Le personnel ne doit pas être exposé à un risque de niveaux 1 et 2.					

La notion de gravité se définit en fonction des objectifs de l'analyse. Ainsi le tableau 2-3 présente une adaptation de la spécification militaire américaine MIL-STD-882C. Selon l'entreprise, les montants figurant dans le tableau 2-3 devront être ajustés. Toutefois, lorsque l'objectif est la protection de la personne, les données du tableau ne peuvent être diminuées.

Tableau 2-3 Gravité

GRAVITÉ					
Description	Objectifs				
	Risque pour le personnel	Perte matérielle	Arrêt de production	Perte de production	Risque environnemental
I CATASTROPHIQUE	Mort	>\$1M	> 4 mois	>\$1M	Long terme, dommage >\$1M
II CRITIQUE	Blessure grave	\$250K-1M	2 sem.-4 mois	\$250K-1M	Moyen terme, dommage \$250K-1M
III PEU IMPORTANT	Blessure mineure	\$1K-250K	1 jour-2 sem.	\$1K-250K	Court terme, dommage \$1K-250K
IV NÉGLIGEABLE		>\$1K	>1 jour	>\$1K	Mineur, dommage <\$1K

Le tableau 2-4, pour sa part, présente une définition de la probabilité associée à l'événement analysé. Cette probabilité, bien que qualitative, pourra être modifiée en des valeurs définies servant à l'analyse AMDEC présentée à la section suivante.

Tableau 2-4 Probabilité associée à un risque

PROBABILITÉ		
Niveau	Descriptif	Définition
A	FRÉQUENT	Répétition fréquente durant la durée de vie
B	PROBABLE	Plusieurs répétitions durant la durée de vie
C	OCCASIONNEL	Répétition occasionnelle
D	RARE	Événement rare
E	IMPROBABLE	Probabilité faible, près de zéro
F	IMPOSSIBLE	Physiquement impossible

Afin de procéder à l'analyse d'un risque, celui-ci doit être identifié. La matrice de risque est une aide ou un guide de conception. Elle permet de faire une relation entre la gravité d'un événement et la probabilité que cet événement se produise.

2.5.3 Analyse des modes de défaillance, AMDE

« *Failure mode and effect analysis, FMEA* »

L'analyse des modes de défaillance (AMDE) et par extension, de leurs criticités (AMDEC), est une méthode de revue de conception servant à identifier et à analyser les faiblesses d'un système. La AMDE est une approche de type « *bottom-up* », c'est-à-dire que l'analyse se fait à partir des éléments constituant le système.

La première étape est de définir les limites du système à analyser, et par la suite, de procéder à la décomposition du système en sous-systèmes et des sous-systèmes en composantes. La décomposition du système se fait jusqu'à l'obtention du niveau de détail utile à l'analyse.

La figure 2-4 tirée de la référence [1] présente la procédure d'analyse des modes de défaillance. Pour chacun des éléments d'un système, une évaluation qualitative est faite pour ensuite se traduire par une codification des défaillances identifiées. Cette codification et les résultats obtenus permettront d'orienter les efforts d'amélioration du système (phases D et E) ou de procéder à des modifications du concept (phases B et C).

L'AMDE est un processus d'analyse applicable aux composantes d'un équipement donné de même qu'il est applicable au procédé de fabrication d'une composante d'un équipement (voir figures 2-4 et 2-5). Ce processus d'analyse est largement utilisé pour l'analyse des bris [1, p. 336].

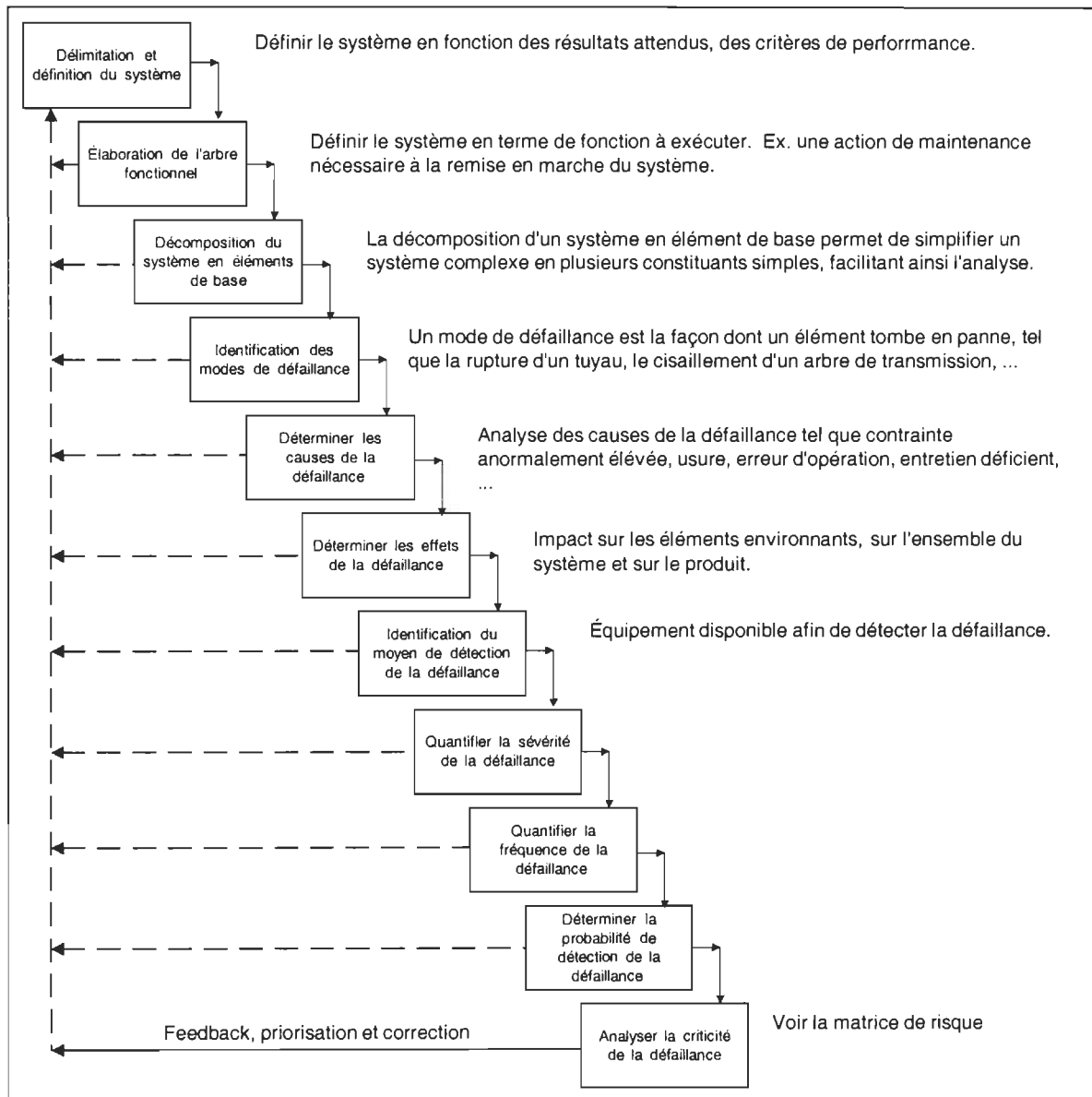


Figure 2-4 Processus d'une AMDE

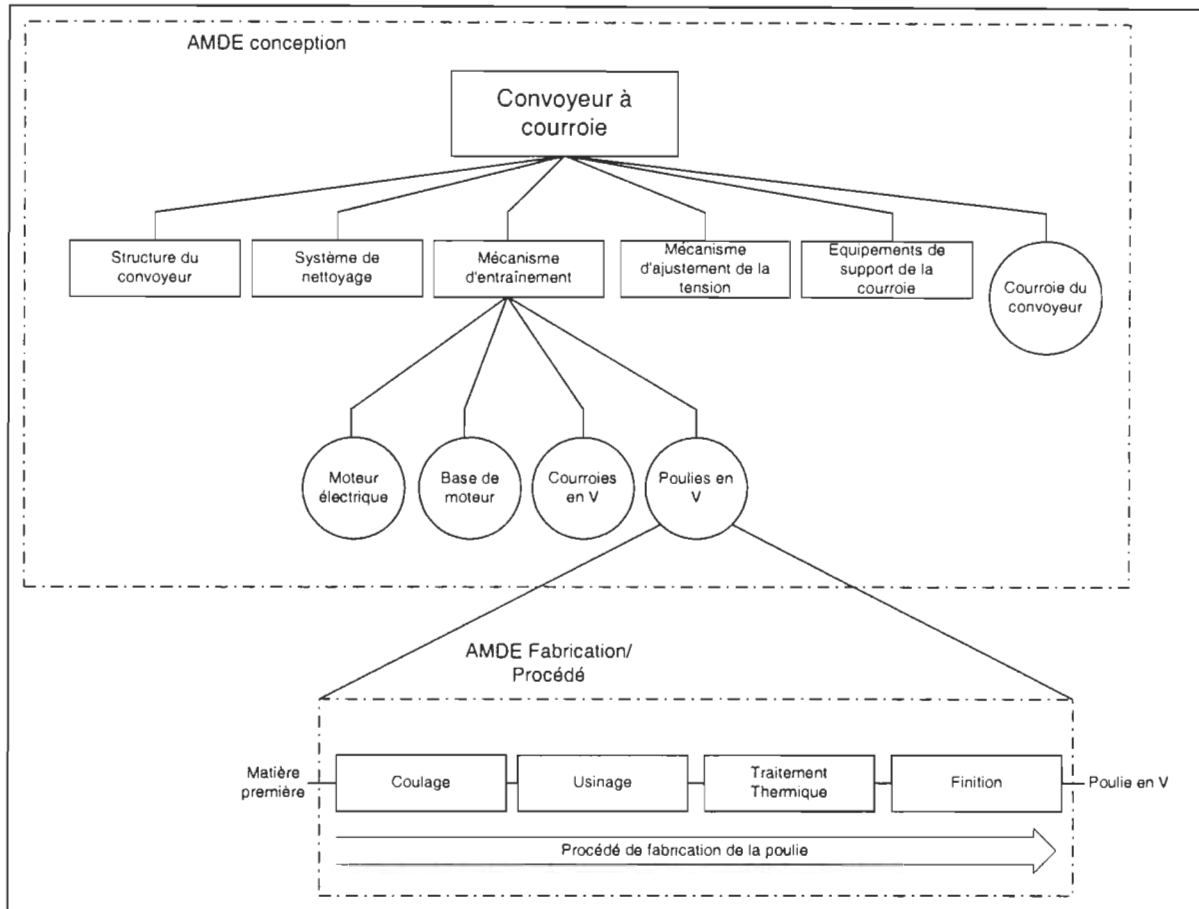


Figure 2-5 AMDE, conception

2.5.4 Arbre de défaillance


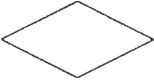



« Fault Tree (FTA) »

L'arbre de défaillance (FTA) est une méthode de représentation symbolique en arborescence des différentes composantes d'un système et des éléments agissant sur ce système [12]. Le FTA fait ressortir les interrelations entre les composantes du système et les éléments agissant sur ce système et menant à une défaillance ou à une panne. De plus, cette méthode sert à déterminer la probabilité de panne. Le FTA est une approche de type top-down, c'est-à-dire que l'analyse démarre avec un événement final, une panne, pour ensuite identifier les causes possibles de cette panne.

Chacune des causes de la panne est ensuite développée indépendamment jusqu'à l'identification des événements initiateurs. L'orientation du FTA est la détermination des causes d'un événement indésirable (une panne).

Les relations entre les composantes et les éléments agissant sur le système sont représentées à l'aide de symboles logiques, voir le tableau 2-5 [adaptation de 15].

Tableau 2-5 Symboles utilisés dans la construction d'un arbre de défaillance

	Événement ou sous-événement	Un événement est le résultat d'un événement non développé et/ou d'une défaillance de base
	Événement non développé	Événement non développé, par manque d'information, ou événement qui sera développé plus tard
	Défaillance de base	Cause primaire d'un événement
	Porte logique ET	Porte désignant que toutes les conditions sous-jacentes sont requises pour que l'événement se produise
	Porte logique OU	Porte désignant qu'au moins une des conditions sous-jacentes est requise pour que l'événement se produise

Afin de déterminer la probabilité de panne du système, on détermine la probabilité de chacun des événements initiateurs (« *basic fault* »). Par la suite, on détermine les relations entre ces événements. Lorsqu'ils sont reliés par une porte logique ET, les probabilités sont multipliées. Dans le cas d'une relation symbolisée par une porte logique OU, les probabilités sont additionnées. On remonte ainsi l'arbre afin de déterminer les probabilités de rencontrer les sous-événements, et ce, jusqu'à l'événement de tête.

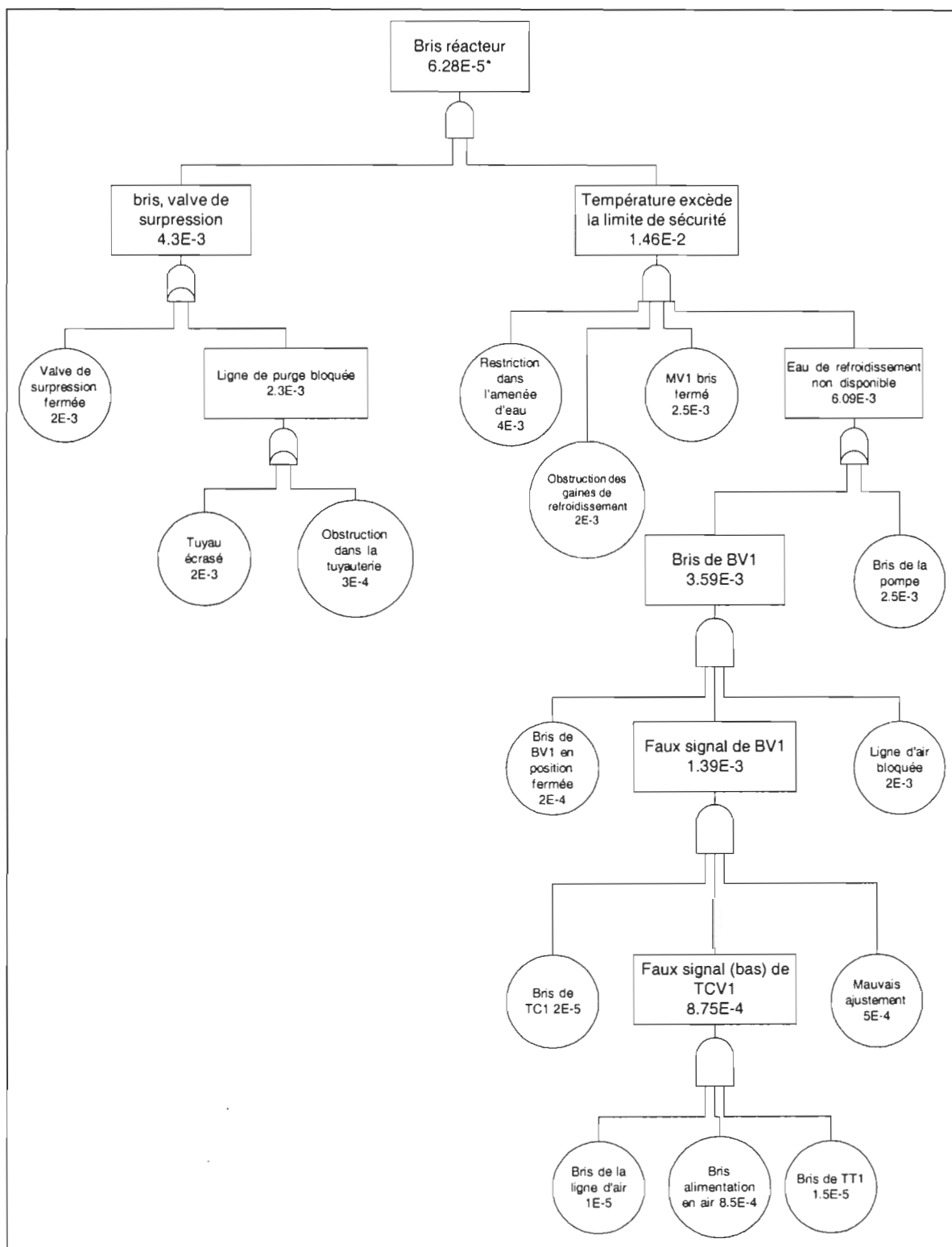


Figure 2-6 Arbre de défaillance, système de refroidissement

La figure 2-6 [12] montre un exemple d'arbre de défaillance appliqué au système de refroidissement d'un réacteur. L'événement de tête est la rupture du réacteur. La probabilité de rupture du réacteur est de 0.0000628. Les sous-événements (par exemple le blocage de la ligne de la valve de surpression) sont analysés jusqu'aux événements initiateurs (pour faire suite à l'exemple ci-dessus, les événements initiateurs sont l'écrasement de la ligne ou la mise en place d'un bouchon sur la ligne ou sur la valve de surpression).

Le FTA est particulièrement utile pour des systèmes à haut risque et des systèmes complexes. Le FTA est un outil de diagnostic et un outil d'aide à l'amélioration de la conception [10, section 3.6].

2.5.5 Analyse sécuritaire, HAZOP

« *Hazard and operability study* (HAZOP) »

L'HAZOP est une méthode d'analyse développée par l'industrie chimique ayant pour but d'analyser toutes déviations des conditions de conception initiale, et pas seulement des changements significatifs. Cette méthode s'adapte bien à l'industrie chimique utilisant un procédé continu et opérant à l'intérieur de limites bien définies [12].

L'analyse HAZOP ne traite pas seulement les problèmes reliés aux équipements, mais aussi la problématique reliée à l'opération et à l'intervention humaine [22].

Lors d'une étude HAZOP, les mots utilisés sont bien définis et sont utilisés pour bien identifier le danger. Le tableau 1 de l'annexe VI présente des mots types.

L'analyse HAZOP peut se faire à n'importe laquelle des étapes de conception et même lors de l'opération. Lors de l'analyse, les questions suivantes pourraient être posées :

- Comment doit-on démarrer de façon sécuritaire l'équipement?
- Comment doit-on arrêter de façon sécuritaire l'équipement?
- Si l'équipement est démarré accidentellement, quels seront les dommages possibles?

- Si un mécanisme de contrôle n'est pas correctement utilisé, est-ce que cela causera des dommages?
- Qu'est-ce qui se produit si l'équipement est en surcharge?
- Qu'est-ce qui se produit si l'équipement est utilisé à vide?
- Peut-il y avoir des projections d'objets ou des éclaboussures du système?
- Qu'est-ce qui se produit si l'équipement est opéré seul, sans les autres équipements normalement utilisés dans le procédé?
- Qu'est-ce qui se produit si l'équipement est opéré sans la supervision d'un opérateur?

La nature des questions fait ressortir l'essence même de l'analyse HAZOP, soit de valider tout écart dans l'opération d'un équipement. Le fait de prendre conscience de ce type d'analyse très tôt dans le processus de conception mènera l'équipe vers une approche sécuritaire et aura pour effet de forcer le questionnement avant la mise en route.

2.5.6 Chaîne de Markov

L'analyse de Markov est une technique de modélisation d'un équipement visant à déterminer la fiabilité de celui-ci en utilisant la fiabilité de ses composantes. Cette analyse prend en compte le fait que la fiabilité d'une composante ne soit pas indépendante de la fiabilité des autres composantes. En réalité, il subsiste des interrelations entre les pannes des composantes et leurs réparations. La panne d'un élément d'un système peut engendrer une surcharge sur le système voisin modifiant ainsi ses conditions d'opération.

L'analyse de Markov utilise une formulation permettant de définir tous les états possibles d'un système. Donc, un système à 3 composantes aura 2^3 états, donc 8 états possibles. En fonction de l'architecture des composantes, soit série, parallèle ou combinée, certains états n'auront pas d'effet sur la fiabilité du système. La figure 2-7 présente une schématisation des états possibles d'un système simple à deux composantes.

L'analyse de Markov se veut une suite logique de l'AMDE et de l'arbre de défaillance. En effet, il est important de connaître les relations entre les diverses composantes du système et les pannes du système.

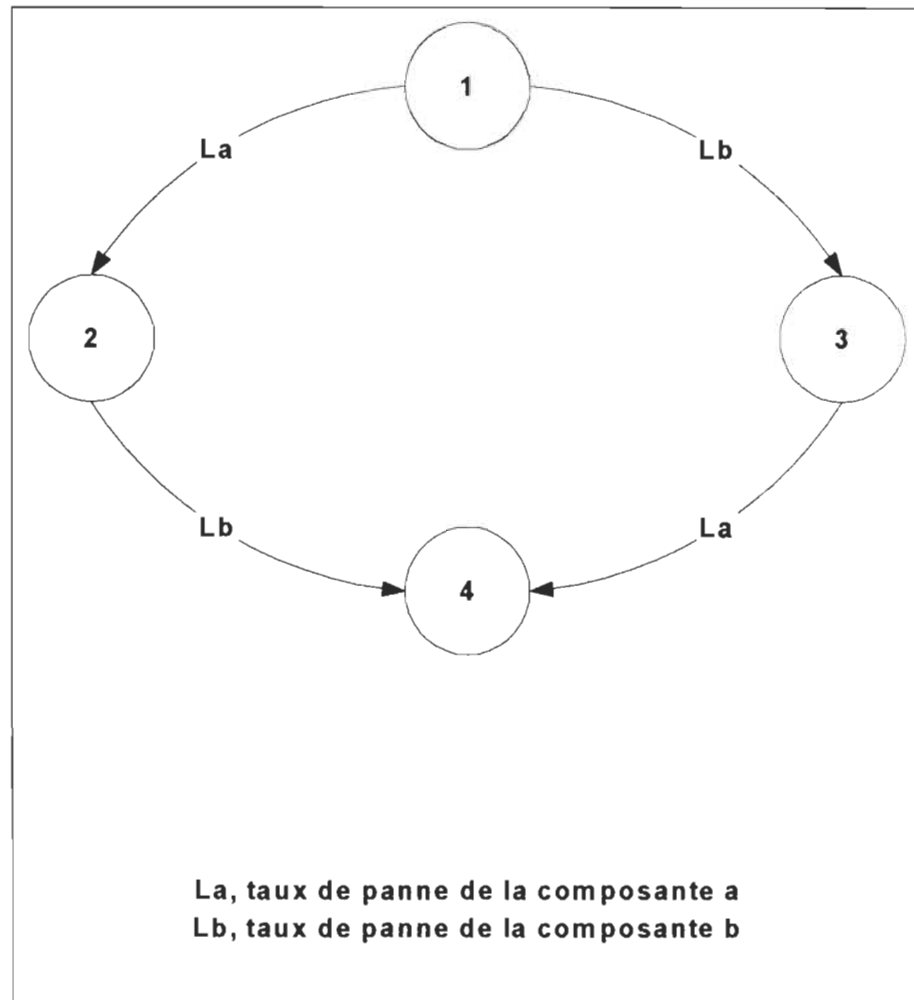


Figure 2-8 Représentation des états possibles d'un système à deux composantes

2.5.7 Analyses multicritères

Les analyses multicritères (AMC) sont des processus d'analyse des solutions possibles et d'aide à la sélection d'une option à un projet donné durant l'étape préliminaire (étape A). L'avantage majeur de ces techniques est de pouvoir faire une évaluation de plusieurs solutions par rapport à plusieurs critères de sélection. Il est ainsi possible de prendre en considération des aspects financiers et des aspects techniques dans une même analyse.

La méthode de pondération (*weighing methods, trade study*) est une méthode d'analyse servant à comparer des options possibles à un projet en permettant d'attribuer un poids à chacun des critères de sélection. Ainsi, chacune des alternatives est évaluée suivant une pondération prédéterminée, par exemple celle présentée au tableau 2-6. L'exemple de sélection d'un équipement de production ci-dessous présente cette technique.

Tableau 2-6 Poids des critères

ITEM	CRITÈRES	POIDS OU PONDÉRATION
1	Coût d'acquisition	20
2	Fiabilité	30
3	Coût de maintenance	20
4	Niveau de production	30
Total		100

La pondération sera la suivante :

- ◆ Coût d'acquisition : Échelle continue, coût de 10 000\$ et moins (20 points) et coût supérieur à 50 000\$ (0 point);
- ◆ Fiabilité, échelle continue entre 90% (0 point) et 100% (30 points);
- ◆ Coût de maintenance, échelle continue entre 2 500\$/an (20 points) et 10 000\$/an (0 point);
- ◆ Niveau de production, échelle continue entre 2 500 unités/mois (0 point) et 10 000 unités/mois (30 points).

Tableau 2-7 Résultats de l'analyse

ITEM	CRITÈRES	%	OPTION #1		OPTION #2		OPTION #3	
1	Coût d'acquisition	20	51 000\$	0	48 000\$	1	32 000\$	9
2	Fiabilité	30	99%	27	95%	15	96%	18
3	Coût de maintenance	20	8 000\$	5.3	5 000\$	13.3	10 000\$	0
4	Niveau de production	30	6 000	14	5 000	10	3 500	4
Total		100		46.3		39.3		31

Selon les résultats de l'analyse de l'exemple précédent (voir tableau 2-7), la solution retenue serait la #1 car elle obtient le plus grand pointage, soit 46.3%. Dans un cas où la cote obtenue serait inférieure à une valeur préétablie, par exemple 50%, l'option #1 pourrait être rejetée aussi.

La méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*) se distingue de la méthode présentée ci-dessus par la façon de déterminer les poids des critères [6]. Cette technique procède par comparaison des critères les uns par rapport aux autres. Cette comparaison prend la forme d'une matrice où les relations entre les critères sont codifiées suivant une échelle numérique discrète de 1 à 9. Pour l'application de cette analyse, il s'agit dans un premier temps de déterminer les critères de sélection applicables à un projet. La sélection des critères pourrait se faire, par exemple, en utilisant le *brainstorming*. Dans un second temps, les critères sont triés et pondérés afin de déterminer l'importance relative des uns par rapport aux autres.

La deuxième phase de l'analyse permet de comparer chacune des alternatives par rapport à un critère. Dès que toutes les alternatives ont été évaluées face à chacun des critères, les résultats sont ramenés à une matrice finale servant d'aide à la décision. Durant le processus d'analyse, des indicateurs permettront de vérifier la consistance des résultats. Ces détails de calcul ne seront pas traités ici.

2.5.8 Ingénierie simultanée

« *Concurrent Engineering* (CE) »

L'ingénierie simultanée ou ingénierie parallèle est une réponse à la demande pour une réduction du temps de conception et de mise en production d'un produit. Elle se définit comme étant une approche systématique visant l'intégration de plusieurs disciplines durant le processus de développement afin de répondre à une demande spécifique. Cette approche demande de considérer, à partir du tout début, tous les éléments influençant le cycle de vie du produit, de la conception jusqu'à la mise au rebut, sans oublier les impératifs de qualité, de coût, de temps et les besoins des usagers [21]. La figure 2-8 présente une schématisation de l'ingénierie simultanée. L'approche CE intègre toutes les orientations de conception (voir section 4 ci-dessus) en même temps, d'où le haut niveau d'intégration. Pour ce faire, une équipe multidisciplinaire est requise. Le but de la méthode est de réduire le temps de conception et de mise en production et aussi le coût de développement du produit ou du système. Tel que vu à la figure 2-9, un retour d'information continu se fait entre les divers intervenants au projet, de même que l'information résultant de l'avancement de la conception est transmise aux autres intervenants. En résumé, la CE se base sur un échange d'information rapide et efficace entre tous les intervenants au projet pour éviter les erreurs coûteuses résultants d'un manque de communication. Le contact constant entre les intervenants évite les problèmes liés à l'interprétation (en référence au jeu du téléphone, par exemple).

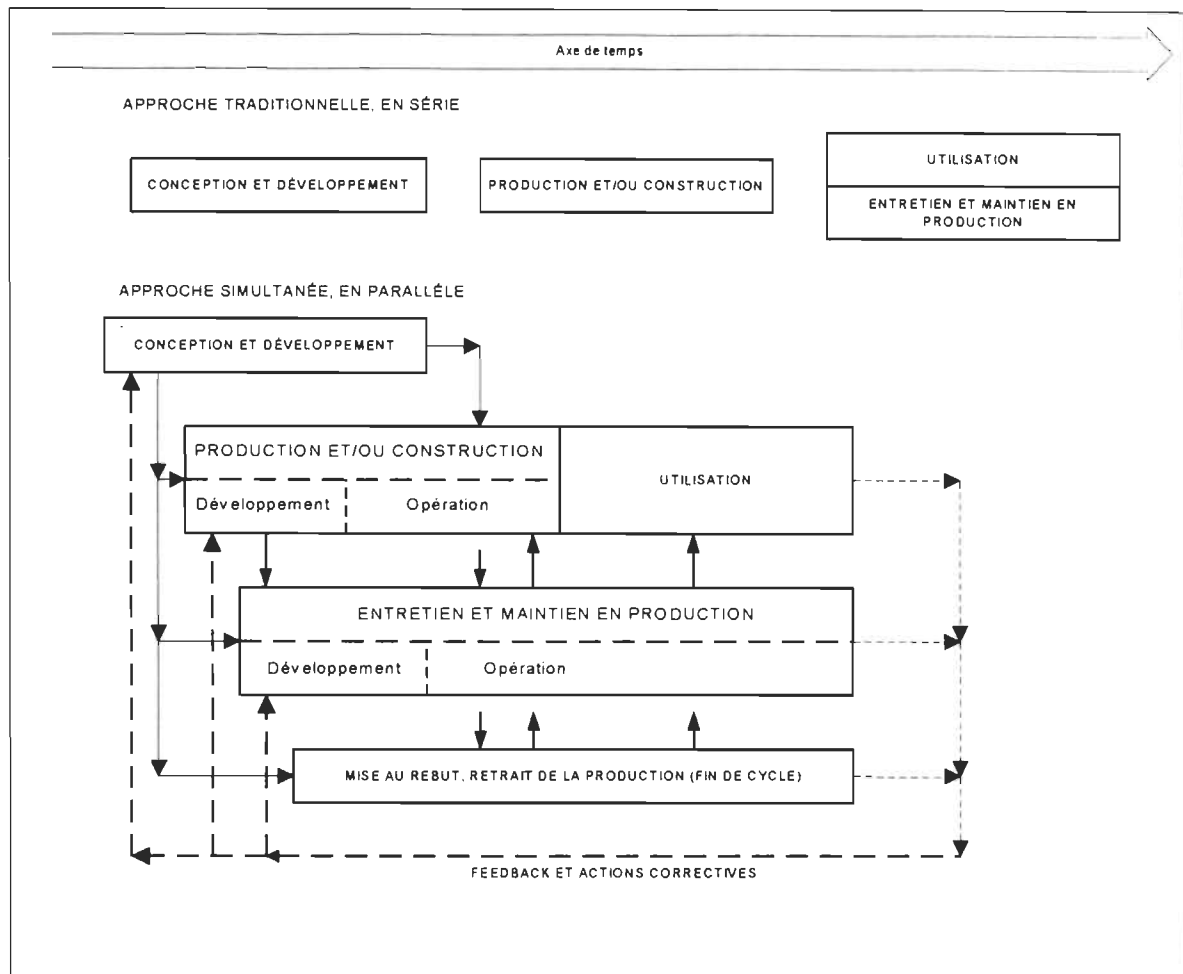


Figure 2-9 Ingénierie parallèle et série [1]

2.5.9 Méthode Taguchi

La méthode Taguchi est un ensemble de techniques expérimentales visant l'optimisation de la conception de produits ou de systèmes, dont le concept de la fonction de perte suppose que toute déviation de la condition nominale représente une perte pour l'entreprise [5]. La méthode Taguchi s'oriente plutôt vers la qualité par la conception plutôt que par l'inspection [5]. La représentation graphique de la fonction de perte est représentée à la figure 2-10. Sa forme mathématique est telle que $L(y) = k(y-n)^2$, où $L(y)$ est la perte en dollar, k une constante de proportionnalité, y est la valeur mesurée et n la valeur cible.

Afin d'optimiser la conception d'un produit, des essais seront menés afin de déterminer l'influence des diverses variables sur le produit final. La méthode Taguchi préconise la réduction du modèle d'expérimentation requise par la méthode expérimentale (« design of experiment », DOE) afin de réduire les coûts des essais et le temps requis pour l'expérimentation.

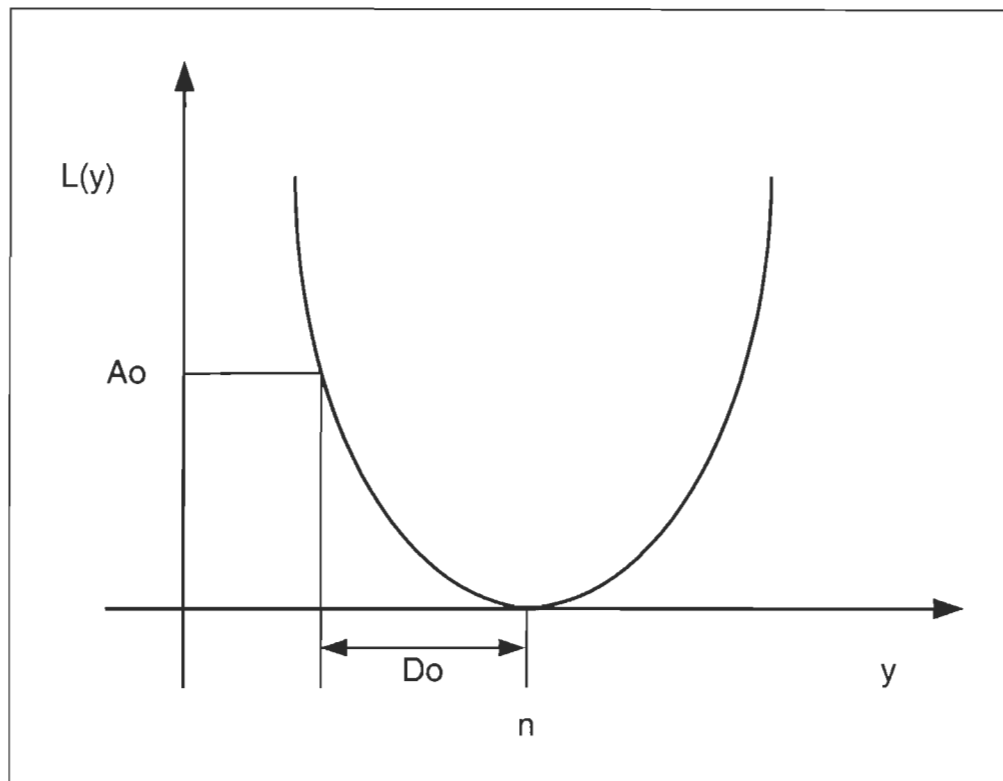


Figure 2-9 Fonction de perte

Le plan d'expérimentation se définit par le nombre de variables et par le niveau de chacune des variables. Selon la méthode DOE, un plan de 3 variables avec 3 niveaux nécessitera 3^3 essais, soit 27 essais. La méthode Taguchi utilisera plutôt un plan L9 permettant de traiter 4 variables avec 3 niveaux chacun. Ce plan nécessitera alors 9 essais comparativement aux 27 requis par un plan complet.

La méthodologie Taguchi implique la mise en œuvre de plusieurs outils mentionnés dans le présent document, dont entre autres FMEA et QFD. L'approche systémique basée sur la méthode Taguchi, telle que présentée par Celik et Burnak [2], propose 13 étapes afin d'optimiser la conception. Ces étapes sont présentées aux figures 2-10 et 2-11.

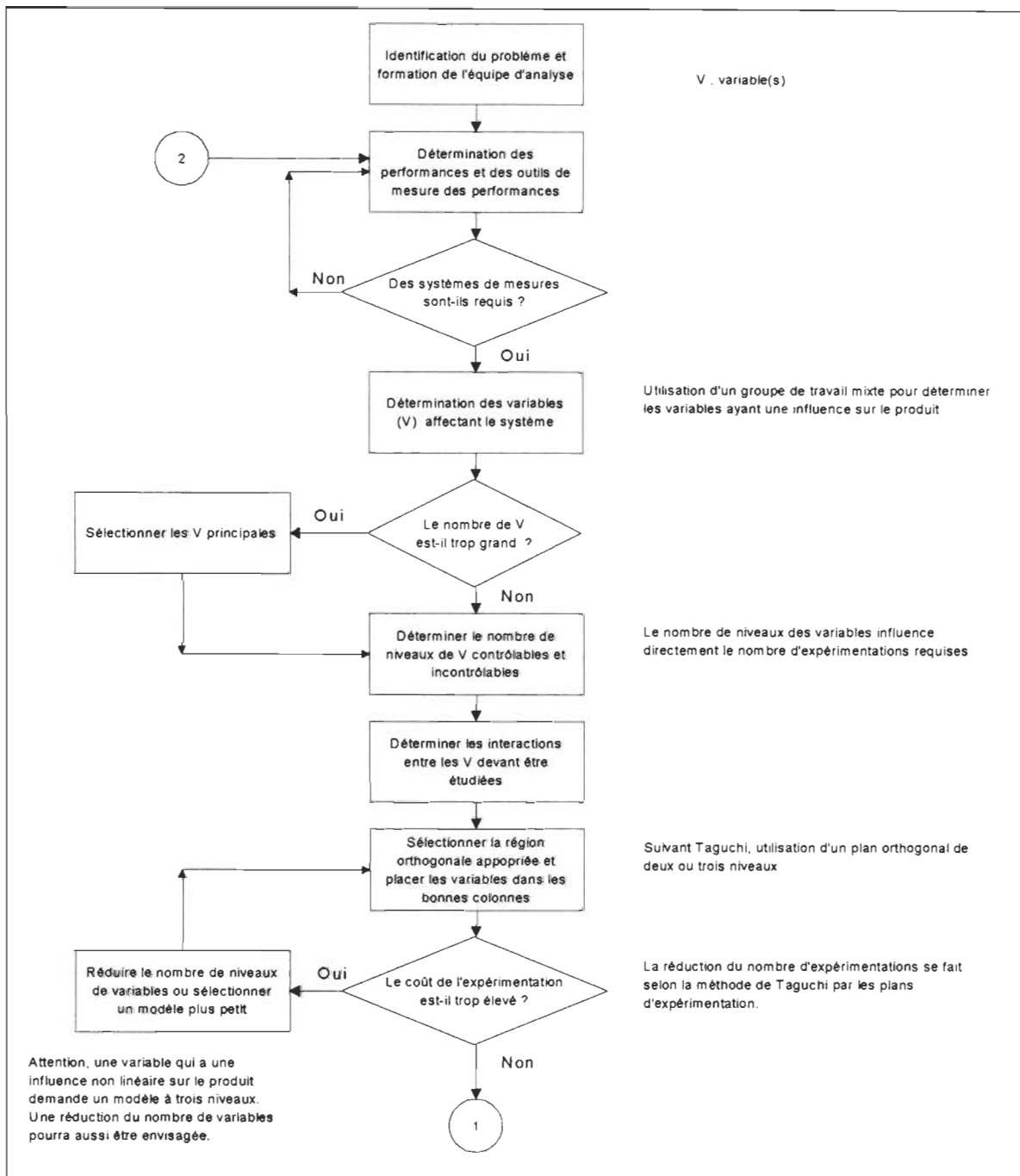


Figure 2-11 Taguchi, partie 1 [2]

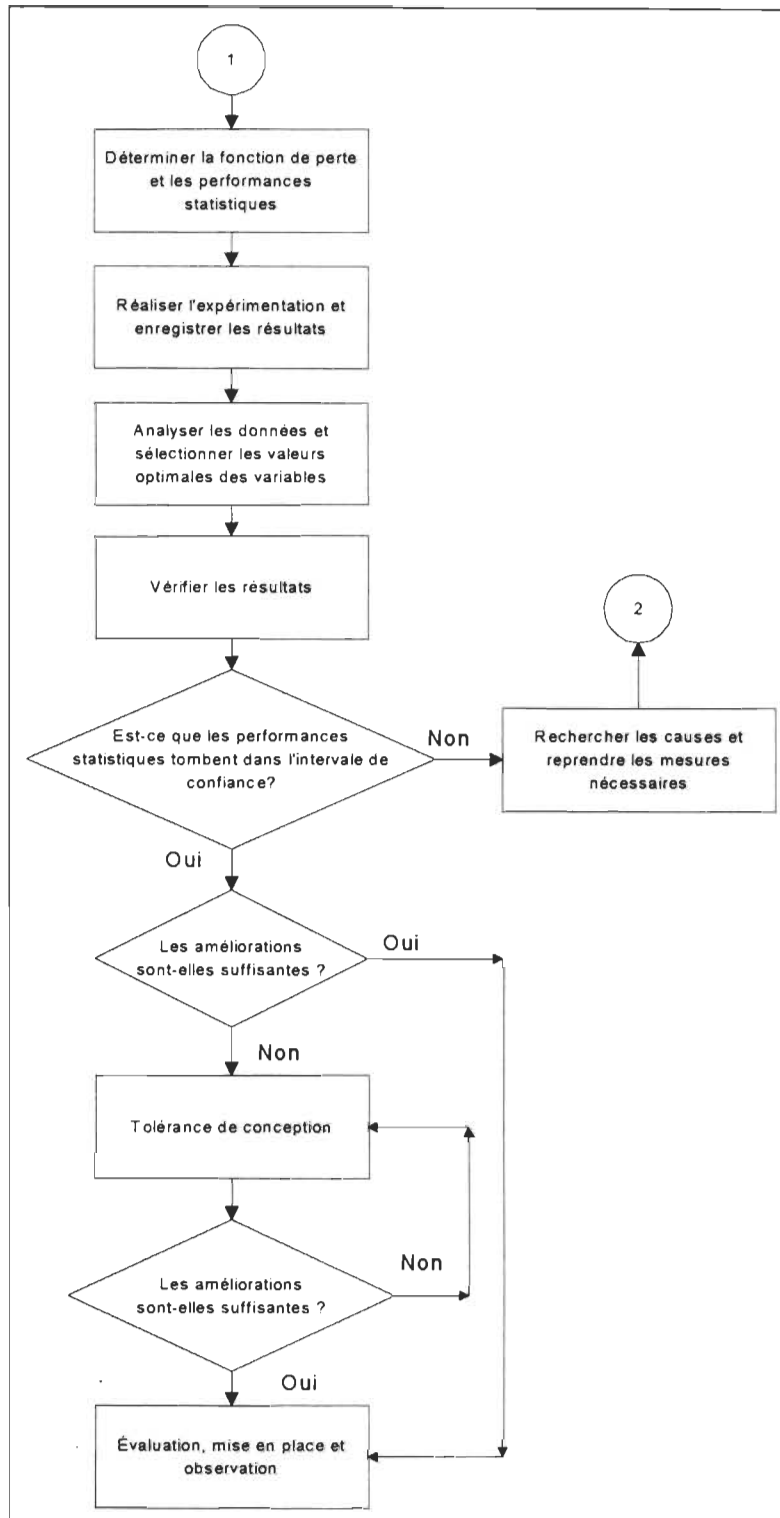


Figure 2-12 Taguchi, suite [2]

La fonction de perte servira à évaluer un concept pour ensuite en faire la comparaison avec l'existant ou avec d'autres concepts. L'optimisation de la conception se fera suite à l'analyse d'un modèle expérimental ou d'une simulation informatique. Le développement de la fonction de perte demande de définir la qualité désirée [8] selon les termes suivants :

- ✓ Plus grand est meilleur (*larger is better*) – la cible (n) est infinie;
- ✓ La nominale est la meilleure (*nominal is best*) – la cible (n) prend une valeur spécifique;
- ✓ Plus petit est meilleur (*smaller is better*) – la cible (n) ultime est zéro.

L'expérimentation permettra de faire ressortir la relation entre les variables influençant le concept.

2.6 CONCLUSION

Le chapitre II présentait diverses orientations de conception et une panoplie d'outils déjà largement utilisés dans l'industrie. La lecture des diverses orientations de conception fait ressortir les objectifs propres à chacune d'elles et aussi l'objectif commun d'amélioration d'un produit. Nous pouvons aussi faire ressortir la relation entre les sommes d'argent impliquées dans un projet et l'orientation de conception. En effet, l'effort sera mis sur l'orientation ayant le plus de chance de réduire significativement les coûts de réalisation d'un projet ou le risque associé au projet.

Le défilement d'outils d'amélioration de la conception aidera à la poursuite de la recherche en fournissant un choix important de techniques éprouvées d'amélioration de la conception.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION

Le chapitre III représente le cœur de ce mémoire. La méthodologie présentée vise à répondre à la problématique exposée au début de ce document. Un résumé de la méthode de travail usuelle sera fait afin de bien cerner la gymnastique associée à la méthodologie de travail intégrant les notions de fiabilité et de maintenabilité.

3.1 MÉTHODE USUELLE DE TRAVAIL

La méthode de travail usuelle recoupe des étapes commerciales et des étapes de conception proprement dites. Cette procédure est généralement encadrée dans un système qualité tel que ISO 9000. La figure 1-1 précédente présente l'organigramme du travail de conception et le tableau 3-1 résume ces étapes de travail sous une autre forme. Cette méthode de travail répond à la majorité des demandes du client. La problématique associée à celle-ci tient plus dans l'opération et l'entretien de l'équipement conçu que dans la qualité de la conception. Notons que la qualité de la conception relève de l'expérience, de l'originalité et des habiletés de l'équipe de travail. Par contre, suite à la conception (étape 7), le concepteur doit être en mesure de répondre à des questions d'ordre opérationnel telles que la disponibilité et la durée de vie espérée de l'équipement, ce qui n'est pas le cas.

Tableau 3-1 Méthodologie de travail usuelle

ÉTAPES		COMMENTAIRES	DOCUMENTS
1	Demande du client	Verbale ou écrite.	
2	Proposition de travail / octroi du contrat	Écrite.	Proposition de travail
3	Cueillette de données de base	Paramètres d'opération, dessins existants et autres informations pertinentes.	Dessins Devis de performance
4	Étude préliminaire et de faisabilité (non traitée dans ce document)		Rapport et dessins de concepts
5	Conception et mise en plan partielle	L'avancement de la conception avant la réunion de coordination est fonction des exigences du client et du contrat entre les parties.	Devis technique Dessins d'ensemble (avancement selon entente préalable). Fiches techniques d'équipements principaux.
6	Coordination avec le client	Validation de la conception et commentaires des utilisateurs.	Compte rendu de réunion.
7	Fin de la conception et de la mise en plan	À cette étape le client a donné ses commentaires et les corrections à faire à la firme.	Devis technique. Dessins d'ensemble et de détails. Fiches techniques des équipements principaux.
8	Appel d'offres pour la réalisation des travaux	Par le service d'approvisionnement du client ou par la firme.	
9	Phase de construction	Généralement supervisée par la firme de consultants.	Rapport d'avancement. Dessins tel que construit.
10	Mise en service	Avec ou sans le support de la firme de consultants.	Rapport de mise en service.

3.2 MATRICE D'INTÉGRATION

3.2.1 Matrice propre aux phases du projet

Le tableau 3-2 propose des interrelations entre la phase du projet et le ou les outils pouvant être utilisés de façon générale. La source d'information pour la construction de cette matrice a été le document de la NASA [8].

Tableau 3-2 Relation entre la phase et les outils [8]

PHASE DU PROJET	OUTILS D'AMÉLIORATION								
	QFD	RISK	AMC	AMDE	FTA	HAZOP	MARKOV	CE	TAGUCHI
A, concept	2	2	1						
B, préliminaire	2		2			2		2	
C, détail	1	1		1	1	1	1	1	
D, fabrication, réalisation					2				2
E, mise en opération							2		1

1 : primaire, technique à faire en premier lieu

2 : secondaire, technique à faire en second lieu

Avec ce tableau, le concepteur sera capable de choisir les outils appropriés en fonction de la phase du projet. De plus, le tableau 3-2 présente une seconde variable permettant de sélectionner une technique plutôt qu'une autre par l'indicateur primaire ou secondaire. Notons que le processus d'amélioration est dynamique tout au long de la conception, ce qui signifie que le concepteur pourrait avoir à réaliser une étude proposée à la phase conception même s'il se situe à la phase de réalisation.

3.2.2 Matrice de relation entre les objectifs et les outils

Le tableau 3-3 présente les divers outils d'amélioration de la conception disponibles en fonction de l'objectif visé par le concepteur.

Tableau 3-3 Outils d'amélioration [8]

OBJECTIF DE CONCEPTION	OUTILS D'AMÉLIORATION							
	QFD	RISK	AMDE	FTA	HAZOP	MARKOV	CE	TAGUCHI
Conception pour la sécurité		√			√			
Conception pour la fabrication							√	
Conception pour l'assemblage							√	
Conception pour l'essai et la maintenance			√	√				
Conception pour l'environnement		√			√			
Conception pour l'opération	√		√	√	√			√
Conception pour la construction								
Conception pour la fiabilité			√	√		√		
Conception pour la maintenabilité			√	√		√		

3.3 RÉSULTATS ATTENDUS

À la fin de cette recherche, les objectifs mentionnés à la section 1.3 devront être atteints. De plus, un outil de conception et une base de données devront être disponibles et utilisables par des concepteurs d'équipements de production (fabricants ou consultants) de même que pour les gens de maintenance qui seront en mesure de modifier le modèle en fonction de l'historique de fonctionnement conçu à l'aide de cet outil. La méthodologie proposée se veut une approche systémique de la fonction de conception par opposition à une approche de conception strictement fonctionnelle. Le modèle proposé devra être adaptable selon les conditions d'opération et pourra être mis à jour avec des données actualisées. Cette caractéristique (de mise à jour) permettra d'offrir une validité externe accrue permettant d'étendre le modèle à divers types d'équipements de production.

3.4 MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

3.4.1 Méthode d'analyse proposée

La présente méthodologie d'analyse servira de fil conducteur lors de la conception d'équipement de production afin d'impliquer les techniques de fiabilité et de maintenabilité le plus tôt possible dans le processus de conception. Cette méthode systématique (voir figure 3-1) servira le concepteur dans le développement de l'équipement et sera entièrement intégrée au processus de conception normal. Chronologiquement, le concepteur passera par les diverses étapes ci-dessous :

- ☐ Les données de base;
- ☐ La normalisation des composantes commerciales;
- ☐ L'arbre fonctionnel;
- ☐ La liste de matériel;
- ☐ L'analyse des modes de défaillance (AMDE);
- ☐ L'arbre de défaillance (FTA);
- ☐ L'évaluation de la maintenabilité;
- ☐ L'analyse de la conception.

La justification des étapes proposées sera faite en détail dans les sections suivantes.

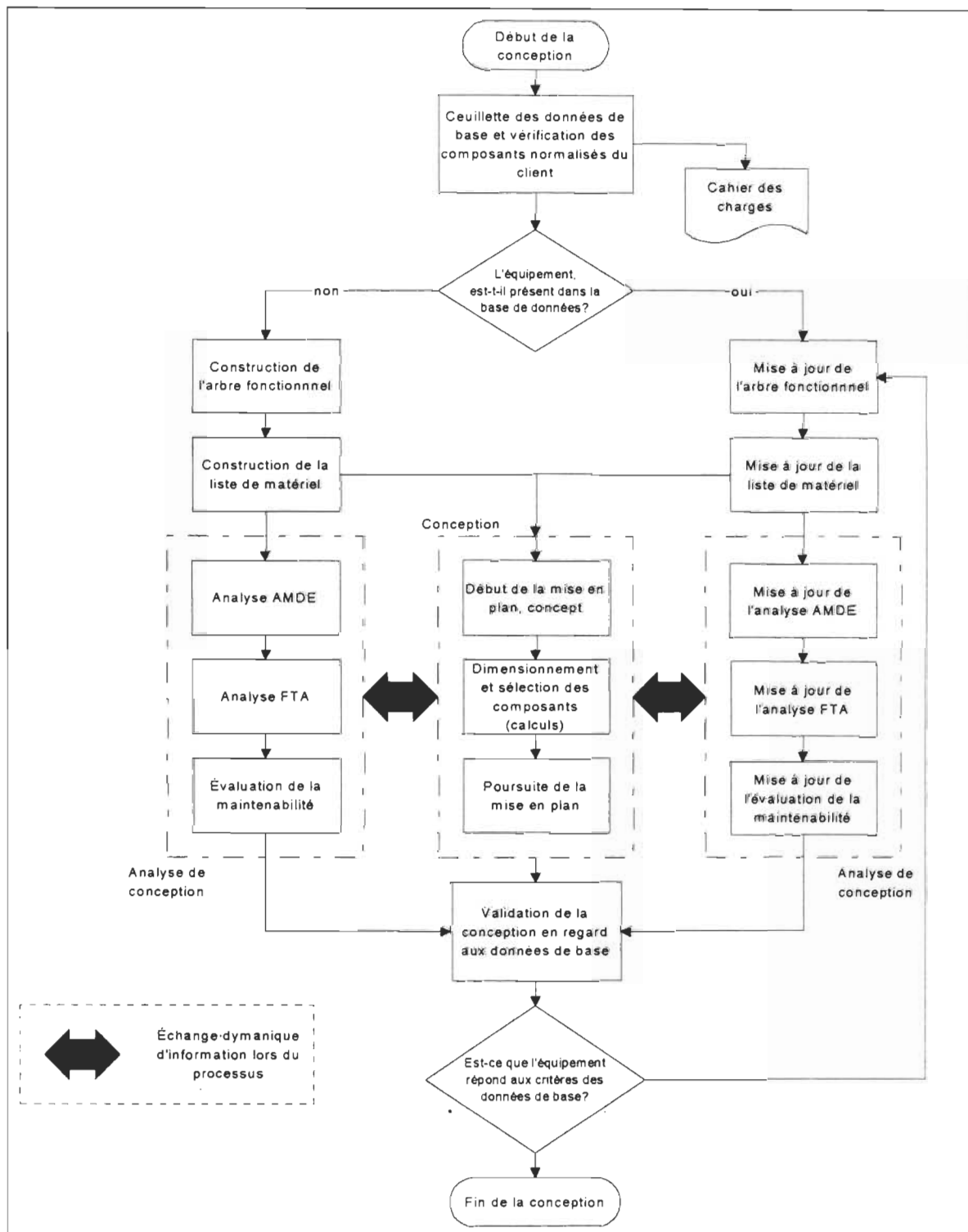


Figure 3-1 Organigramme de la méthode proposée

La méthodologie proposée se veut une approche « *top-bottom* », c'est-à-dire que le concepteur partira du concept global de l'équipement et progressera par niveau ou par couche horizontale jusqu'à la conception ou la sélection des éléments de base. Le concept global se veut l'élément de tête et intègre les critères de conception de l'équipement découlant des demandes du client, de l'analyse des besoins et des données de base. Les critères de conception devraient prendre la forme d'un cahier des charges qui servira tout au long du processus de développement. Ce cahier devra être disponible pour tous les membres de l'équipe de conception et leur être présenté au tout début du processus.

L'approche par niveau permet de valider l'interaction et la compatibilité des composantes ou des éléments avec les autres composantes en amont et en aval. À chacun des niveaux, le concepteur sera certain que tous les éléments constituant ce niveau répondent aux cahiers des charges et que ces composantes sont compatibles entre elles. Lorsqu'un problème surviendra en cours de conception, le retour en arrière (niveau précédent ou même niveau) pour pallier à la situation impliquera alors moins d'effort que lors d'une conception verticale. Dans une conception verticale, la composante est détaillée jusqu'à son dernier niveau sans pour autant tenir compte des autres composantes. Dans ce cas, si un problème survient, tous les efforts déployés dans la conception de détail seront perdus, ce qui entraînera des pertes importantes (temps et argent) et aura pour effet d'engendrer des frustrations.

Le niveau 0 est le point de départ de la conception et désignera l'équipement tout entier. Les niveaux suivants seront une marche de plus vers le détail de l'équipement. Donc, en fonction de la phase du projet (A, B, C, etc.) le concepteur choisira le niveau de détail désiré, requis pour répondre à la demande du client.

3.4.2 Autres facteurs influençant la conception

Tel que discuté à la première section, il y a plusieurs orientations possibles lors de la conception des équipements de production ou d'autres biens. Selon les besoins du client, le concepteur sera amené à orienter son objectif. Le tableau 3-4 reprend les diverses orientations possibles et présente des observations et commentaires propres à leur mise en application.

Tableau 3-4 Résumé des orientations de conception

Conception pour la sécurité	L'analyse sécuritaire est de plus en plus présente lors de la conception d'équipement de production dans les grandes entreprises de l'industrie lourde.
Conception pour la fabrication	Lorsque le concepteur travaille pour l'entreprise qui fabriquera l'équipement ou lorsque les coûts de fabrication sont importants et qu'ils doivent être réduits.
Conception pour l'assemblage	Cette orientation vise la facilité de l'assemblage; elle sera plus pertinente lorsque le produit sera fabriqué à plus grande échelle. Ce type d'orientation pour un équipement unique rejoindrait la conception pour la maintenabilité.
Conception pour l'essai et la maintenance	Tout comme la conception pour l'assemblage, cette orientation est plus justifiée lors de la production en série d'un bien.
Conception pour l'environnement	L'environnement est un sujet de plus en plus préoccupant, dans le cas de produit unique, l'orientation portera surtout sur les performances environnementales de l'équipement et la compatibilité avec la norme ISO 14000.
Conception pour l'opération	Cette orientation rejoint les concepts de fiabilité, de maintenabilité et de sécurité. De plus elle intègre l'environnement opérationnel de l'équipement. Cette orientation se doit d'être considérée pour tout projet de conception d'équipement de production.
Conception pour la construction	Cette orientation sera plus importante lors des grands projets, et ce, pour des équipements majeurs. Toutefois, le concepteur se doit de s'assurer que l'équipement en voie de conception pourra être mis en place adéquatement dans l'usine de sa destination.
Conception pour la fiabilité	La fiabilité prend son sens dans la production en continu et pour des équipements critiques. Dans cette optique, l'équipement se doit d'être conçu afin de fournir une disponibilité maximale par la réduction du nombre d'arrêts.
Conception pour la maintenabilité	Tout comme pour la fiabilité, la maintenabilité devient prédominante dans l'industrie de production en continu, comme l'industrie lourde de la métallurgie et des pâtes et papiers. Dans ces cas, l'équipement se doit d'être conçu pour faciliter la fonction de maintenance afin d'augmenter la disponibilité par la réduction des temps d'arrêt.

3.4.3 Données de base

Avant de débiter toute conception, le concepteur doit s'assurer d'avoir en main toutes les données de base nécessaires à l'élaboration d'un concept préliminaire (phase A). À défaut d'avoir ces données de base, le concepteur devra poser les hypothèses nécessaires à la poursuite du processus. Il va de soi que l'approbation des hypothèses par le client ou l'utilisateur sera un atout.

La précision et l'exactitude des données influenceront sur le niveau de satisfaction du client. Si les informations de base sont imprécises ou même erronées, il va de soi que le concept développé a peu de chance de répondre à la demande. La rédaction du cahier des charges doit se faire pour minimiser les interprétations. Des critères quantitatifs seront préférables aux critères qualitatifs. Plus l'objectivité des critères sera grande, moins les risques d'interprétation seront importants. La définition des termes doit aussi faire partie du cahier des charges et sera un élément qui contribuera à l'objectivité des données de base. Par exemple, si un client demande un équipement productif, la définition de productif devra alors se faire pour quantifier ce paramètre. Pour ce client, la définition de productif pourrait signifier l'atteinte d'une cadence de 100 unités par heure avec une disponibilité de 90%.

3.4.4 Normalisation des composantes commerciales

La normalisation des composantes tant mécaniques qu'électriques a pour but de réduire le niveau des inventaires et d'augmenter l'interchangeabilité des composantes d'un équipement à un autre. Même si le coût d'acquisition est majoré à cause de l'utilisation de composantes non usuelles pour le manufacturier, l'utilisateur final gagnera au change. Le fait de retrouver des composantes similaires sur plusieurs équipements permettra une maîtrise plus facile des particularités de chacune en réduisant le temps d'apprentissage de l'équipe d'entretien et d'opération.

Cette normalisation prendra la forme de fiches techniques indiquant le fabricant, le type de composant utilisé dans l'entreprise et les détails pertinents. Prenons l'exemple de boyaux hydrauliques, les embouts et la presse utilisés pour les sertir sont propres au modèle et au fabricant. Ainsi un boyau du fabricant XYZ utilisera des embouts adaptés au boyau. Il sera impossible, ou même dangereux d'utiliser des embouts ou l'équipement de pressage d'un autre fabricant sur ce boyau. Le fait de normaliser les boyaux hydrauliques permettra à l'entreprise de conserver des boyaux, des embouts et d'acquérir une presse à un coût raisonnable. Advenant un bris, il sera plus facile de remplacer le boyau défectueux.

La normalisation des composantes commerciales s'inscrit à la suite de la collecte des données de bases. Le concepteur poursuivra ainsi dans cette étape les recherches avec le client afin de minimiser la variété des éléments similaires, comme par exemple de roulement.

3.4.5 Arbre fonctionnel

L'arbre fonctionnel est une décomposition en arborescence des diverses fonctions d'un équipement. L'arbre fonctionnel servira à bien comprendre le fonctionnement de l'équipement et permettra de sélectionner les sous-ensembles les plus importants du point de vue de l'opération. De plus, l'arbre fonctionnel représente un aide-mémoire et un répertoire de tous les éléments constituant l'équipement.

La construction de l'arbre fonctionnel se présente sous deux volets. Le premier est une réponse à la fonctionnalité décrite dans les données de base et le second volet est une intégration des composantes normalisées lors de la conception proprement dite de l'équipement. Le concepteur utilisera la liste de matériel normalisé développée à l'étape précédente afin d'incorporer les pièces déjà utilisées par le client.

Selon le degré du niveau d'analyse désiré, le concepteur pourra poursuivre la décomposition des systèmes en sous-systèmes et des sous-systèmes en d'autres sous-systèmes. La poursuite ou non de la décomposition dépendra des caractéristiques intrinsèques de la composante. C'est-à-dire que la décomposition prendra fin lorsque les informations pertinentes sur la composante seront disponibles. Par exemple, si la fonctionnalité demandée de la composante demande l'utilisation d'un roulement à billes et que les informations pertinentes à la sélection du roulement sont disponibles, il ne sera pas nécessaire de poursuivre la décomposition du roulement en sous-systèmes. Le degré de précision sera alors suffisant pour un concepteur de convoyeur à bande. Cependant, selon le type d'équipement à traiter, la décomposition du roulement pourrait être justifiée. Ce qui permettra d'approfondir davantage le degré de connaissance de l'équipement. La criticité de la composante servira alors de justification à la poursuite de l'analyse.

3.4.6 Liste de matériel ou liste de matériel normalisé

La liste de matériel est le répertoire des éléments constituant tous les ensembles et sous-ensembles d'un équipement donné. Cette liste servira à identifier et répertorier les éléments constituant l'équipement. Les divers éléments pourront être des sous-ensembles (groupe assemblé), des groupes de composantes, des équipements connexes ou des pièces servant à construire l'équipement. Afin de suivre une logique d'analyse, la structure de la liste de matériel devrait être la même que celle de l'arbre fonctionnel développé à la section précédente.

Dans le cas où une liste normalisée de composantes est disponible, elle servira à orienter la sélection des éléments de l'équipement. Des listes normalisées sont régulièrement utilisées lorsqu'il y a une répétition dans la fabrication ou la conception d'un équipement, tel est le cas pour un convoyeur à courroie par exemple. Dans les sections ci-dessous, des listes normalisées seront utilisées.

Une autre fonction de la liste normalisée sera de servir d'aide-mémoire afin de ne pas oublier d'éléments d'un équipement. De plus, son emploi permettra de présenter les diverses options possibles d'un équipement au client.

3.4.7 Analyse des modes de défaillance

Cette section couvrira l'analyse des modes de défaillance, AMDE, et par extension l'analyse des modes de défaillances et de leurs criticités, AMDEC. Cette analyse poussera le concepteur à analyser chacune des composantes de son équipement et d'en évaluer son implication dans la fiabilité de l'équipement.

Le point de départ de l'analyse sera la construction de l'arbre fonctionnel et l'élaboration de la liste de matériel de l'équipement. La décomposition de l'équipement permettra de connaître chacune des composantes constitutives. Le degré de détails de l'arbre fonctionnel sera fonction de l'information ou de la connaissance de sous-ensembles ou des composantes. L'expérience fournira les indices nécessaires pour réduire la décomposition et ainsi éviter de mener l'analyse subséquente vers une mauvaise direction.

Par la suite, pour chacune des composantes ou des sous-ensembles, l'AMDE sera conduite. Tel que mentionné ci-dessus, le degré de détail de l'analyse sera fonction des informations requises et disponibles. La mise en commun des analyses de défaillance déjà faites et l'utilisation de bases de données permettront de réduire le temps requis à l'étude. De plus, le regroupement de composantes semblables permettra aussi de réduire ce temps d'analyse, tout comme la technique de fabrication de groupe (composantes ayant les mêmes caractéristiques).

L'analyse d'un palier de roulement à semelle de marque Dodge, ou tout simplement l'analyse d'un roulement, servira aussi à l'analyse d'autres roulements qu'ils soient d'un autre manufacturier ou d'un autre type. Dans les deux cas, la nature des constituants est la même et les causes de bris sont les mêmes, voir l'exemple au tableau 3-5.

Tableau 3-5 Liste de pièces comparatives de paliers de roulement

Palier Dodge, double interlock, 3 7/16	Palier SKF, SNL ou SNH
Bâti du palier, à expansion ou fixe	Bâti du palier, à expansion ou fixe
Unité de roulement modulaire, incluant Roulement, bague de serrage, joint d'étanchéité, graisseur	Roulement; Joint d'étanchéité; Manchon conique, etc.

Le fabricant d'équipements standards offre généralement des tableaux de dépannage. Les bases de données génériques peuvent aussi nous fournir des modèles et des tableaux de défaillances typiques selon les composantes.

Ce type d'analyse exige une connaissance approfondie de l'équipement et de son comportement. Les bases de données et les informations des manufacturiers fourniront la majorité des informations. Toutefois, cette analyse n'étant pas quantitative, l'arbre de défaillance sera requis pour quantifier la fiabilité de l'équipement.

3.4.8 Arbre de défaillance

L'arbre de défaillance, tel que discuté au chapitre II, est une représentation schématique de l'AMDE réalisée ci-dessus. De plus, le FTA ajoute un modèle mathématique afin de déterminer la probabilité que l'événement de tête se produise, dans notre cas, un bris de convoyeur. Les données issues de l'AMDE seront réorganisées afin de combiner les événements initiateurs requis pour engendrer la panne du système.

Dans cette section, l'emphase sera mise sur l'application de cette méthode d'analyse à des cas généraux et plus en détail à un cas réel.

L'arbre de défaillance devrait être bâti, dans un premier temps, de façon générale pour répondre à une large gamme de possibilité et être raffiné lors d'analyse spécifique.

3.4.9 Évaluation de la maintenabilité

Durant la phase d'ingénierie de détail, les composantes majeures d'un équipement devront être analysées du point de vue de la maintenance afin de répondre adéquatement aux demandes du client. L'utilisation de méthodes qualitatives telles que l'analyse multicritère se prête bien à cet exercice. Le tableau 3-6 donne un exemple du type de grille pouvant être utilisé. La revue de conception du point de vue de la maintenabilité ne doit pas se faire lors d'une vérification finale des dessins de détails. À ce niveau, les modifications de concept sont coûteuses et ne sont pas toujours possibles.

Tableau 3-6 Grille d'analyse de la maintenabilité

CRITÈRES	PONDÉ- RATION	OPTION A		OPTION B	
		Cote	Total	Cote	Total
	A	B	A x B	C	A x C
Nombre de composantes. Selon grille d'analyse.	5	8	40	10	50
Nombres de composantes mobiles. Selon grille d'analyse.	5	7	35	5	25
Coût des pièces de rechange.	10	8	80	7	70
Conformité des composantes avec les composantes disponibles localement, interchangeabilité.	15	7	105	10	150
Utilisation d'outillage spécialisé.	5	5	25	8	40
Manuel d'opération et d'entretien, clarté et facilité d'utilisation.	5	10	50	10	50
Mécanisme d'alignement.	15	7	105	6	90
Accessibilité des composantes (pièces d'usure).	10	3	30	5	50
MTTR, si disponible.	5	0	0	0	0
MTTF, si disponible.	5	0	0	0	0
Système d'auto diagnostic.	5	0	0	0	0
Système de cadencage, énergie zéro intégrée.	10	7	70	7	70
Autres facteurs.	5	4	20	4	20
Sous-total			560		615
Pondération en fonction de l'analyse de risque			x 0.85		x 0.9
Total			476		554

3.4.10 Validation de la conception

Puisque la conception de l'équipement avait comme point de départ les données de base, il serait approprié de vérifier le concept final en regard des données de base. Si des écarts entre le point de départ et le point d'arrivée sont observés, ceux-ci devraient être documentés. Le processus de conception étant dynamique, il est fort possible que des modifications des données de base soient nécessaires, alors la mise à jour du cahier des charges devrait présenter et expliquer ces modifications.

Selon la fonction de la personne qui analyse la conception d'un produit, il est fort à parier que les objectifs varient selon la fonction. Donc, il serait souhaitable de procéder à la revue de conception en équipe mixte, c'est-à-dire avec un représentant des principaux secteurs d'activité de l'entreprise impliquée dans la construction de l'équipement. Un représentant du client serait généralement le bienvenu. Il va de soi qu'il est impensable qu'une personne puisse considérer, lors de la conception, toutes les variables reliées au produit. La personne responsable de la fabrication pensera naturellement à la méthode de fabrication, tandis que l'utilisateur sera intéressé par la facilité d'utilisation de l'équipement. Donc, une revue avec une équipe permettra de compenser ce manque involontaire de connaissance. Il n'est pas conseillé d'utiliser à outrance ce processus car ceci aura pour effet de freiner la conception et la réalisation du projet. Le responsable doit alors cibler les moments opportuns de revue de conception.

3.4.11 Synthèse de la méthodologie

Les techniques courantes de conception n'intègrent normalement pas d'outil d'amélioration ou d'analyse de la conception, à moins d'une demande explicite du client. Les vérifications et revue de conception portent généralement sur les détails commerciaux du devis et sur la fonctionnalité globale de l'équipement conçu. Il n'existe pas ou peu d'historique ou de banque de données générées par les projets déjà faits et mis en service.

La mise en place de la méthode proposée permet de structurer les données au fur et à mesure que les projets se réalisent. La section suivante qui traitera de la mise en place de la méthodologie fera ressortir cet avantage. Le tableau 3-7 fournit une grille de comparaison entre la méthode proposée et la méthode traditionnelle.

Tableau 3-7 Grille de comparaison entre la méthode proposée et la méthode traditionnelle

ÉTAPE	MÉTHODE TRADITIONNELLE	MÉTHODE PROPOSÉE	COMMENTAIRES
Les données de bases	Oui.	Oui.	Point de départ de la conception.
Normalisation des composantes commerciales	Sur demande du client seulement.	Générée par la mise en place d'une base de données.	
L'arbre fonctionnel	Non.	Analyse avant la conception.	
La liste de matériel	Oui, surtout lors de la mise en plan.	Réalisée avant la mise en plan de l'équipement.	
L'analyse des modes de défaillance (AMDE)	Non.	Fera partie de la base de données à faire pour les nouveaux équipements.	
L'arbre de défaillance (FTA)	Non.	Idem à AMDE.	
Évaluation de la maintenabilité	Sur demande du client seulement.	Intégration des notions de maintenance lors de la conception.	Amélioration systématique du processus de conception
Analyse de la conception	Généralement faite.	Fermeture de la boucle.	

Bien que les concepteurs chevronnés fassent preuve d'ingéniosité et d'originalité lors de la mise en oeuvre de la conception d'équipement, il n'en reste pas moins que l'analyse de leurs concepts n'est pas réalisée dans un cadre systémique de travail. L'approche présentée a l'avantage d'intégrer des techniques bien maîtrisées dans un cadre de travail normal. La mise en oeuvre d'analyses de fiabilité et de maintenabilité requiert des efforts en temps et ressources additionnelles. Un des objectifs de la technique est de réduire au minimum les efforts additionnels afin de fournir un produit de qualité aux clients. La mise en place graduelle de la méthodologie permettra de bâtir une base de données, ce qui aura pour effet de réduire l'effort lors des analyses subséquentes au minimum.

3.4.12 Mise en application de la méthode de conception

Cette section présente l'approche à prendre pour la mise en place de la méthode de conception présentée dans ce document. Sans être exhaustive ni restrictive, la technique d'implantation se veut une ligne de conduite menant à l'amélioration de la conception d'équipement de production manufacturière.

Dans un premier temps, la direction de l'entreprise de consultants doit prendre position afin de soutenir la démarche. Y voir là une augmentation injustifiée des coûts de conception vouera à l'échec l'effort d'amélioration visé par cette approche de travail.

L'implication de l'équipe de travail sera importante comme dans toute implantation d'une nouvelle technique ou technologie. La direction devra cibler le groupe le plus susceptible de concevoir des équipements de production. Par la suite, la mise en place devra se faire graduellement au fur et à mesure que les projets se déroulent. Dans ce type de travail, les composantes principales reviennent toujours. Comme par exemple, le système d'entraînement, que l'on traite d'un ventilateur ou d'un convoyeur, il y a toujours un système qui permet d'activer l'équipement. L'équipe de conception devra tirer profit du fait que certaines composantes reviennent d'un équipement à l'autre. Dans un premier projet, l'analyse portera seulement sur les composants principaux du système d'entraînement. La mise en place de la base de données débutera ainsi, par cette première analyse. Sur le prochain projet, l'analyse du système d'entraînement sera simplement adaptée pour tenir compte des critères spécifiques de ce nouvel équipement. De plus, l'analyse pourra s'étendre à un autre sous-groupe de l'équipement, comme par exemple les roulements. La figure 3-2 montre un cheminement pour la mise en place de la méthode de travail. Nous pouvons distinguer le processus graduel de construction de la base de données. De plus, l'utilisation soutenue des modèles d'analyse accumulés au cours des projets viendra enrichir la base de données. Un des éléments sous-jacents à ce type de technique est que l'analyse des composants permettra aux concepteurs d'approfondir son niveau de connaissance des éléments qu'il traite. Plus les analyses des composants seront poussés dans les détails, plus la connaissance des particularités propres aux composants sera grande.

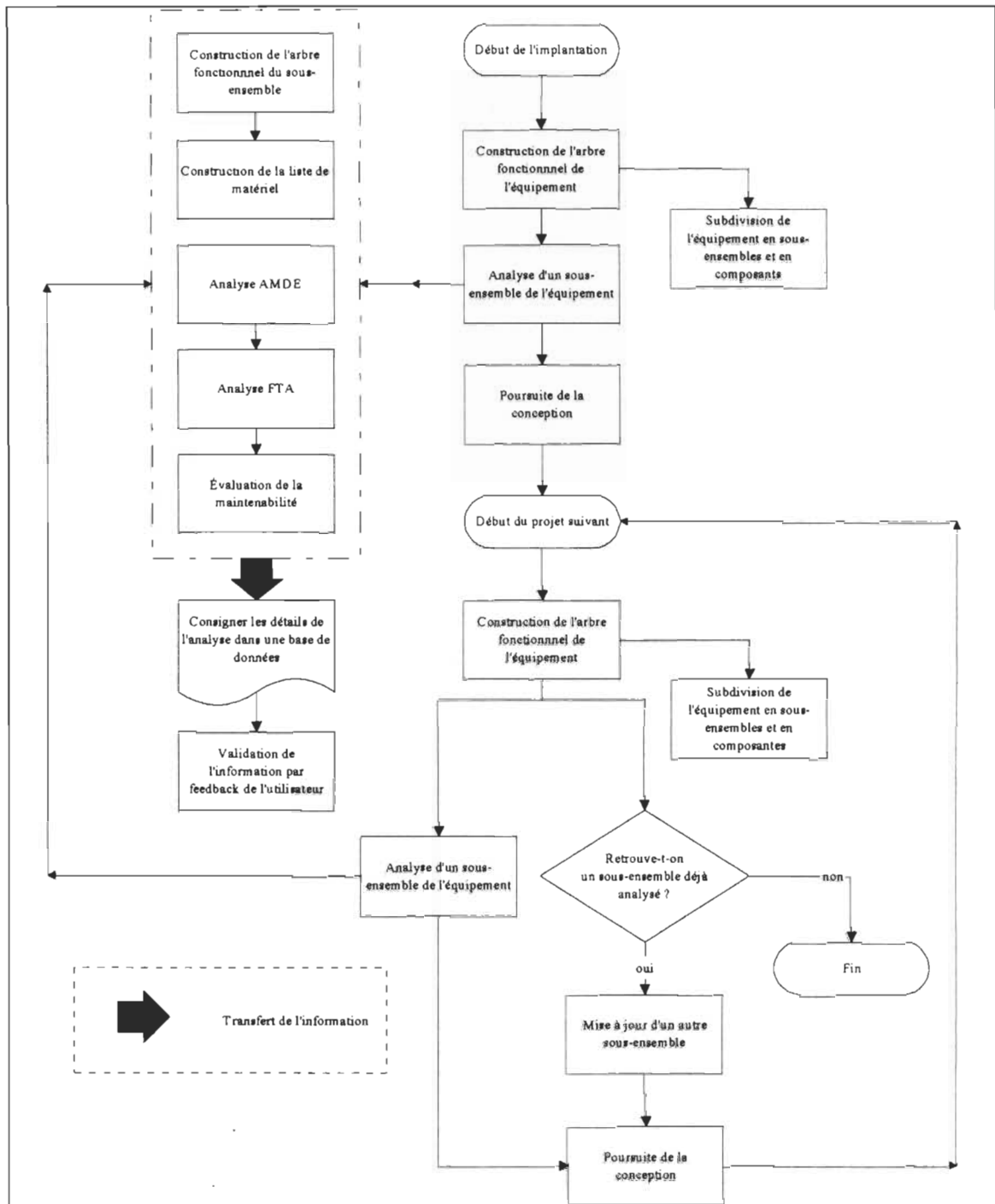


Figure 3-2 Organigramme d'implantation

CHAPITRE IV

APPLICATION

Le chapitre IV se veut une application de la méthodologie présentée au chapitre III. Avant de procéder à la mise en application sur un convoyeur à courroie, discutons des divers éléments constituant un équipement ainsi que des particularités de ceux-ci.

La connaissance des composants d'un équipement représente un élément clé dans le succès de l'analyse de celui-ci. Dans cette optique, la section 4.1 traitera de certains éléments particuliers à prendre en considération lors de la conception de nouveaux équipements de production.

4.1 CONCEPTION DES ÉQUIPEMENTS

La conception d'équipements de production revient à faire l'intégration de divers composants commerciaux dans le but de remplir une fonction, et ce, dans la majorité des cas. Le début de la conception se doit d'être la mise en situation, soit la définition des conditions d'opération et l'élaboration des critères de conception. Suite à cette étape, le concepteur sera en mesure de procéder aux divers calculs servant à dimensionner la structure de l'équipement et aussi à sélectionner les composants standards.

4.1.1 Équipements de production, données de base générales

Lors du développement de nouveaux équipements, certains paramètres reviennent régulièrement, décrivant l'environnement d'opération. L'utilisateur de l'équipement, habitué dans son environnement, n'aura pas toujours comme réflexe de fournir les informations pertinentes au concepteur. L'utilisation d'un aide-mémoire comme le formulaire (tableau I.1) de l'annexe I soulèvera le questionnement et permettra la prise en compte des contraintes propres au type d'industrie.

L'intégration, dès le départ, de l'ensemble des contraintes spécifiques aura pour effet d'accroître la qualité de la conception. Même lorsque le concepteur est familier avec une entreprise, l'utilisation d'un aide-mémoire évitera de négliger certains paramètres, car à l'intérieur d'une même usine, les conditions d'opération et d'entretien varient.

4.1.2 Qualité des composants standards

Lors de la conception d'équipements de production, le concepteur aura à choisir parmi une panoplie de composants standards. Bien que chaque manufacturier prétende avoir le meilleur composant, il n'y a pas de données permettant de sélectionner un fabricant par rapport à l'autre, autre que des bases de données de clients. De plus, la qualité des composants sélectionnés influera directement sur la fiabilité de l'équipement. Puisque le prix seul n'est pas un gage de qualité, comment peut-on évaluer la fiabilité des composantes? À la phase A ou B, les détails de la conception ne sont pas connus et l'application d'une méthode quantitative n'est pas possible. L'utilisation d'une méthode d'analyse comparative est alors préférable. Cette technique permet de comparer une composante non mise à l'essai avec une référence connue. Cette comparaison se fera sur la particularité technique de chacune des composantes. Le concepteur aura alors à lire attentivement les fiches techniques des produits, à comprendre le mode de fonctionnement du composant et au besoin questionner le représentant technique. Ainsi, une évaluation éclairée pourra être faite. L'approche multicritère présentée ci-dessus pourrait aussi être utilisée.

Lors de la phase C, ingénierie de détail, les paramètres d'opération sont connus et permettent l'utilisation d'une analyse quantitative basée sur des critères prédéfinis servant de point de départ.

Les trois éléments de l'analyse sont :

- ☐ Les critères d'évaluation;
- ☐ Le barème d'évaluation ou la pondération;
- ☐ La valeur en regard des critères.

Dans certains cas, le client identifiera les composants normalisés déjà présents dans son usine. Bien appliquée, cette pratique réduira le nombre de pièces de rechange. Dans une telle situation, le choix d'un composant sera un compromis entre la standardisation et la fonctionnalité.

Suite à l'analyse par arbre de défaillance, certains éléments de machine seront identifiés comme étant représentatifs de la fiabilité de l'équipement. Ces composantes pourront alors être analysées plus en détail. L'étude de plusieurs fiches techniques de composants commerciaux révèle que les méthodes de calculs de durée de vie utilisées pour les roulements sont reprises pour d'autres composantes utilisant des roulements. Par exemple, l'étude des documents techniques d'un réducteur de vitesse Dodge a révélé que le facteur de service des réducteurs de type Torque-Arm était relié à la durée de vie des roulements. Ainsi, pour les facteurs L_{10} et L_{50} , représentant la durée de vie pour une fiabilité de 90 et 50%, dans cet exemple, un facteur de service de 1.4 correspondait à une durée de vie de 15 300 heures (L_{10}) et de 76 500 heures (L_{50}).

4.1.3 Éléments structuraux

Les éléments structuraux composent le corps même d'un équipement. La structure de base servira à la mise en place de divers organes disponibles sur le marché. La variabilité et la disponibilité d'une gamme importante de matériaux rendent la conception d'un équipement à la fois très problématique et facile.

L'aspect problématique tient du fait que le concepteur doit faire son choix en fonction des besoins structuraux en ayant la responsabilité de sélectionner les matériaux les plus économiques pour l'application, et ce, afin de demeurer compétitif.

L'aspect facile tient du fait que de nouveaux matériaux sont développés continuellement et qu'ils permettent de répondre à des besoins de plus en plus spécifiques.

Comme dans tous les procédés de fabrication des autres composantes des équipements, le procédé de fabrication de l'acier n'est pas idéal, ce qui cause une variation des propriétés mécaniques des aciers. Selon le manuel de conception de la compagnie Oxelösund, les caractéristiques de l'acier à haute résistance suivent une courbe normale. La charge appliquée sur l'acier peut aussi suivre une courbe normale, ce qui permettra de déterminer une probabilité de se retrouver dans une zone dangereuse, soit l'intersection des deux courbes normales mentionnées ci-dessus.

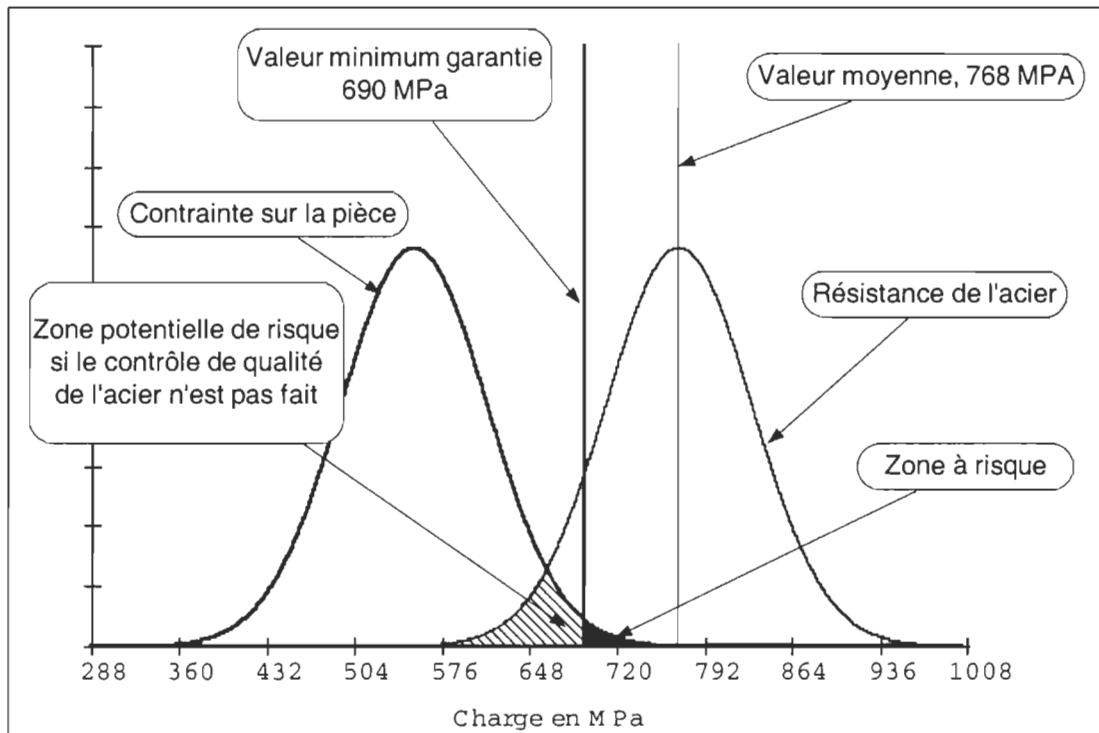


Figure 4-1 Distribution de la résistance avant écoulement

Comme nous pouvons l'observer sur le graphique de la figure 4-1, la garantie de ne pas retrouver d'acier dont la limite élastique est inférieure à celle donnée par la ligne pointillée a pour effet de réduire considérablement les probabilités de se retrouver dans la zone critique.

Les propriétés de l'acier ne sont pas les seuls éléments pouvant influencer la probabilité de bris d'une pièce. La fabrication, les charges extérieures, la précision des calculs et la possibilité de pouvoir effectuer des inspections représentent d'autres éléments à considérer. Afin de tenir compte des autres facteurs influençant le risque de bris, le concepteur introduira un facteur de sécurité. Dans le cas où ce facteur ne serait pas spécifiquement spécifié par un code ou une loi, la méthode présentée à la figure 4-2 pourrait être utilisée.

$FS = \frac{k_3 \cdot k_4}{k_1 \cdot k_2}$	FS, facteur de sécurité
k_1	Facteur tenant compte de la résistance de l'acier, 1.0
k_2	Facteur de fabrication qui dépendra des procédés de fabrication, de la nature des inspections et de la rigueur d'application des procédures. Dans des conditions normales, 0.6 Implication intensive des procédures, 0.9
k_3	Facteur de variation de la charge ou de la contrainte. Chargement statique, 1.0-1.2 Fatigue, conditions connues, 1.5 Fatigue, conditions mal déterminées, 2.0
k_4	Facteur tenant compte de la précision des calculs d'ingénierie, de l'habileté du concepteur, du niveau de confiance de l'établissement des charges. Facteur normal, 1.3 Conditions favorables, paramètres bien maîtrisés, 1.1
Exemple	$k_1=1$ $k_2=0.6$ $k_3=1.5$ $k_4=1.3$ $FS=3.25$
$F = 1 - \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)$	F, représente la probabilité de bris de la pièce
$\mu = S_m - S_{min}$	Où S_m est la résistance moyenne de l'acier Et S_{min} est la résistance minimale garantie
$\sigma = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$	s_1 et s_2 , écarts types propres des valeurs S_m et S_{min}
Le facteur de sécurité FS vient réduire la valeur de S_{min} , et cette dernière valeur représentera la contrainte limite acceptable pour la pièce.	

Figure 4-2 Calcul du facteur de sécurité

Pour bien comprendre la portée de l'application du facteur de sécurité, prenons l'exemple suivant où la contrainte appliquée sur la pièce sera égale à la contrainte admissible.

$$S_{\min} = 350 \text{ MPa} \quad s_1 = 60 \text{ MPa}$$

$$S_m = 383 \text{ MPa} \quad s_2 = 20 \text{ MPa}$$

$$S_{\text{adm}} = \frac{S_{\min}}{FS}$$

$$\sigma = \sqrt{s_1^2 + s_2^2}$$

$$\mu_1 = S_m - S_{\min}$$

$$\mu_2 = S_m - S_{\text{adm}}$$

$$\mu_1 = 33$$

$$\mu_2 = 275$$

$$\sigma = 63.25$$

$$Z_1 = \frac{\mu_1}{\sigma}$$

$$Z_2 = \frac{\mu_2}{\sigma}$$

$$Z_1 = 0.52$$

$$Z_2 = 4.35$$

d'où les probabilités sont;

$$F_1 = 1 - \Phi(Z_1)$$

$$F_2 = 1 - \Phi(Z_2)$$

$$F_1 = 1 - 0.6985$$

$$F_2 = 1 - 0.9999993193$$

$$F_1 = 0.3015$$

$$F_2 = 0.000000681$$

Suite aux résultats obtenus ci-dessus, il va de soi que l'application d'un facteur de sécurité adéquat aura pour effet de réduire considérablement le risque de bris. Cet exemple fournira une méthode de calcul afin de déterminer la fiabilité des structures de support des équipements. Les données normalement présentées dans la littérature et dans les normes sont les valeurs minimales de la limite élastique. La valeur moyenne et l'écart type ne sont généralement pas donnés.

4.1.4 Alimentation électrique et systèmes de contrôle

Dans notre environnement industriel, la transmission de puissance origine presque exclusivement de l'énergie électrique. Non seulement la puissance de base provient de l'électricité, mais aussi l'énergie de contrôle. Dans certains cas, la logique de commande est pneumatique ou hydraulique; cependant, la commande la plus répandue demeure la commande électrique. Il va de soi que ces systèmes représentent à eux seuls une spécialisation. Le but de la présente section n'est pas de traiter de la fiabilité des systèmes d'alimentation en puissance ni des systèmes de commande, mais plutôt de fournir des informations pertinentes à inclure dans le processus de conception.

Durant la conception, le concepteur en mécanique aura avantage à côtoyer de près les concepteurs en automatisation et contrôle et les programmeurs. L'interaction entre les disciplines permettra de rendre l'ensemble de la tâche plus facile.

Le mode de commande de l'équipement devra faire partie intégrante des données de base à la conception. Tout comme les performances, la méthode d'opération de l'équipement est requise. L'orientation sera tout à fait différente si l'opération est manuelle ou automatisée. Lorsque l'opération est manuelle, le concepteur prendra en compte la vision de l'opérateur; par contre, si l'opération est automatisée, les instruments devront pallier à la vision de l'opérateur et devront fournir à l'automate les données requises pour le bon déroulement de la tâche. Une attention particulière devra être portée sur la sécurité de l'équipement afin de prévenir tout accident dû à une opération automatique. La sécurité doit faire partie de la conception, autant pour la sécurité des gens autour de l'équipement que pour la protection de l'intégrité de l'équipement même.

Lors de la conception d'un équipement de production automatisé, les éléments de contrôle requis pour la tâche à accomplir devront être intégrés dans le mécanisme même de l'équipement. Si le concepteur en mécanique procède à la conception sans tenir compte du mode de contrôle et des instruments disponibles, il s'expose à reprendre certaines parties de son travail parce que le contrôle de l'équipement peut être impossible.

Pour ce qui est de l'alimentation électrique, les données de fiabilité sur ce sujet sont disponibles dans des documents comme ceux de l'*Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* (IEEE) [10] et dans des bases de données génériques.

4.2 CONVOYEUR À COURROIE

Le convoyeur à courroie est largement utilisé dans l'industrie primaire des métaux pour la manutention du minerai. Du fait, la conception d'un tel équipement est très bien maîtrisée par les fabricants. L'accent sera mis sur la philosophie de conception d'un équipement de production plutôt que sur la technique de conception.

4.2.1 Description

Le convoyeur à courroie traité dans cet exemple est une version simplifiée d'un équipement conçu et actuellement en opération. Afin d'alléger ce rapport, des détails particuliers ont été retranchés du concept initial. L'annexe II présentera un aperçu des étapes de la conception. Les critères spécifiques de l'équipement sont présentés au tableau 4-1 ci-dessous. Ce tableau constitue en quelque sorte la fiche de spécification du convoyeur.

Tableau 4-1 Critères de conception

CRITÈRES	DÉTAILS		NOTES
Matériel	Coke de pétrole		Abrasif, non explosif
Granulométrie	Fine à 2 po		Très variable
Capacité nominale	700	Tma	
Capacité maximale	1100	Tma	Le procédé ne peut fournir ce débit en continu
Longueur approximative	150	pieds	À vérifier avec l'arrangement
Élévation du point de chute	10	pieds	À vérifier avec l'arrangement
Énergie disponible	Électrique		575 V/3 Ph/60 Hz
Contrôle	Automatisé		Automate programmable Allen Bradley

4.2.2 Conception

Tel que mentionné ci-dessus, les détails de la conception se retrouvent en annexe II. Cependant, certains éléments de la conception demandent de porter un peu plus d'attention. L'étude d'implantation du convoyeur dans le bâtiment ne fait pas partie du présent document; cependant, l'analyse du point de vue de la maintenance demande de regarder l'équipement dans son environnement. Les accès et facilités de maintenance tels que pont roulant, potence ou autres devront être discutés afin de permettre l'entretien du convoyeur. Le tableau 4-2 présente des points particuliers propres au convoyeur à courroie traité comme exemple.

Tableau 4-2 Facilité de maintenance

ITEM	IDENTIFICATION	FACILITÉ REQUISE	COMMENTAIRES
1	Poulie de tête avec mécanisme d'entraînement	Équipement de manutention et accès	Monorail au-dessus de la tête du convoyeur, capacité en fonction de la pièce ou de l'ensemble le plus lourd.
2	Courroie de convoyeur	Espace pour entrer la courroie sur le convoyeur et équipement de manutention	L'espace requis doit être pourvu des accès requis à l'équipement pour soutenir la courroie lors de l'arrivée et aussi permettre de la dérouler. La courroie arrive en rouleau sur un support métallique.
3	Poulie de queue	Équipement de manutention et accès	Accès libre pour l'utilisation d'un chariot élévateur, emplacement moins critique que la tête du convoyeur.
4	Convoyeur, rouleaux porteurs	Accès pour l'entretien et l'opération	Passage sur au moins un côté du convoyeur requis pour l'entretien et pour l'opération.

4.2.3 Autres facteurs influençant la conception

D'autres facteurs influencent la conception de l'équipement. Le tableau 4-3 reprend les diverses orientations de conception et commente leurs applications dans le présent exemple.

Tableau 4-3 Orientation de la conception

Conception pour la sécurité	L'analyse sécuritaire de l'équipement est une demande formelle de la part de plusieurs entreprises, surtout dans le secteur de l'industrie lourde. La notion d'ergonomie sera aussi traitée en plus de la sécurité.
Conception pour la fabrication	Étant donnée la simplicité et la connaissance de ce type d'équipement, cette orientation ne sera pas développée.
Conception pour l'assemblage	Étant donnée la simplicité et la connaissance de ce type d'équipement, cette orientation ne sera pas développée.
Conception pour l'essai	Non requise.
Conception pour l'environnement	Les performances environnementales de l'équipement et la compatibilité avec la norme ISO 14000 devront être traitées. Les plans et devis feront l'objet d'une révision par un comité. Par contre, cet aspect ne sera pas couvert dans le présent travail. Le diagramme de procédé montre les raccordements possibles à un système de dépoussiérage. Dans le cas d'un convoyeur à courroie, l'utilisation de grattoirs et de brosses aidera à réduire la poussière générée par la courroie de retour du convoyeur.
Conception pour l'opération	Certains des éléments de cette orientation seront requis lors de la conception, tels que la prise en compte des pièces de rechange et la standardisation avec les autres équipements similaires existants dans l'usine.
Conception pour la construction	L'implantation et les méthodes de mise en place font partie des demandes du client. Les facilités de maintenance dont il est fait mention au tableau précédent serviront aussi pour la construction.
Conception pour la fiabilité	L'équipement est un maillon important de la chaîne de production, sa fiabilité est donc importante.
Conception pour la maintenabilité	L'équipement se doit d'être conçu pour faciliter la fonction de maintenance afin d'augmenter la disponibilité par la réduction des temps d'arrêt.

Le convoyeur comme tel est un composant ou un équipement inclus dans une ligne de production. Comme il a été mentionné précédemment, la conception se fera par couche horizontale. Donc, pour le convoyeur lui-même, des validations devront être faites pour s'assurer que l'équipement s'intègre dans la ligne de production. Pour reprendre notre exemple, le concepteur devra s'assurer que la capacité du nouveau convoyeur CON-005 est au moins égale à celle du convoyeur CON-004 en amont, mais aussi que cette capacité n'excède pas celle de la vanne trois voies en aval. Le diagramme de procédé, figure 4-3, illustre l'interaction des divers équipements.

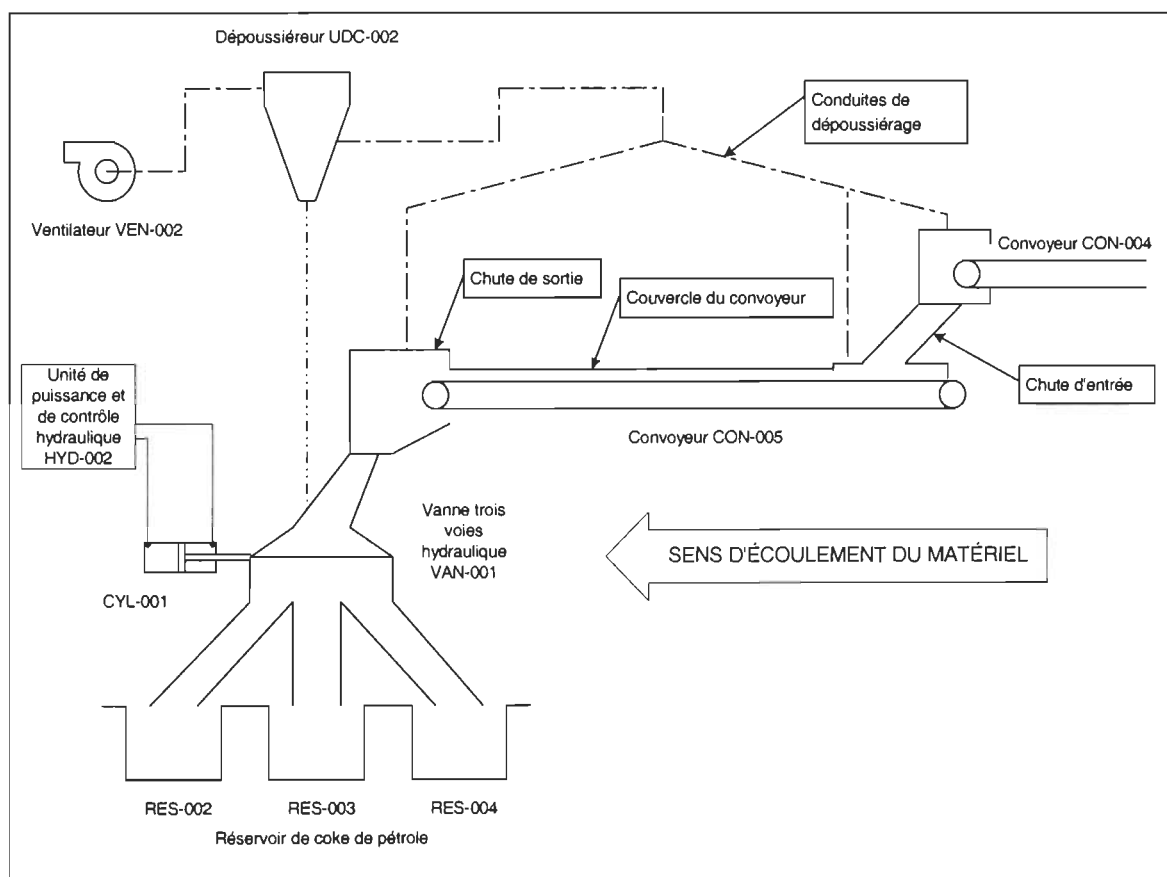


Figure 4-3 Diagramme d'écoulement

4.2.4 Arbre fonctionnel

La construction de l'arbre fonctionnel du convoyeur permet de bien cerner l'équipement et de définir adéquatement les critères de conception et les performances à rencontrer (l'annexe III présente l'arbre fonctionnel complet pour notre exemple). L'une des principales difficultés lors de la construction de l'arbre fonctionnel est la délimitation des sous-systèmes. La figure 4-4 nous donne un aperçu de l'arbre fonctionnel de l'entraînement du convoyeur. De plus, l'arbre fonctionnel fournira aux autres intervenants dans un tel projet les informations pertinentes à l'intégration du convoyeur à l'intérieur de la ligne de production. Puisque l'information relative aux diverses fonctions du convoyeur se retrouve sur l'arbre fonctionnel, cet outil sera utile lors de la mise en service de l'équipement. Dans cette étape de construction, le personnel doit vérifier la fonctionnalité de l'équipement avec, comme base, les critères de conception. Donc, l'utilisation de l'arbre fonctionnel ne se limitera pas seulement à l'analyse de fiabilité et de maintenabilité, elle sera intégrée aux tâches normales de conception.

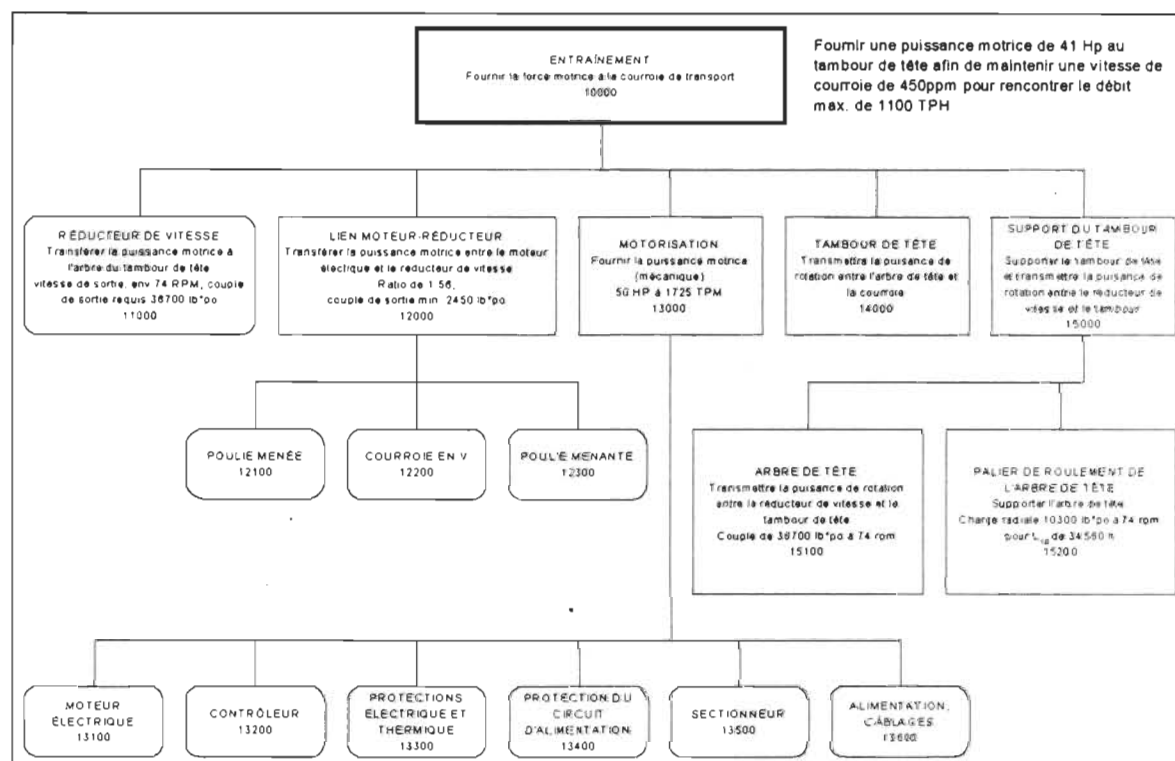


Figure 4-4 Arbre fonctionnel, entraînement du convoyeur

4.2.5 Analyse des modes de défaillance

L'analyse des modes de défaillance pour un convoyeur (voir annexe IV) ou pour tout autre équipement peut prendre une ampleur assez importante selon le degré d'analyse considéré. Afin d'effectuer l'analyse, le convoyeur fut subdivisé en sections et chacune des sections a été codifiée comme suit :

- L'entraînement, section 10000;
- Support de courroie, section 20000;
- Structures et chutes, section 30000;
- Courroie de convoyeur, section 40000;
- Systèmes auxiliaires, section 90000.

Par la suite, l'analyse a porté sur chacune des sections qui furent subdivisées en sous-section et ainsi de suite jusqu'au niveau de détail requis. Le niveau de détail requis est fonction de l'information disponible en regard de l'élément à analyser. Dans le cas du réducteur de vitesse, le niveau d'analyse requis détermine le point d'arrêt de l'analyse; selon le cas, l'AMDE portera sur le réducteur de vitesse comme entité ou nécessitera une décomposition en détail du réducteur. Si le réducteur est traité comme entité, l'analyse portera sur le réducteur de vitesse seulement. Dans le cas de la décomposition en détail, l'analyse portera alors sur les éléments suivants :

- Bâti du réducteur, gauche;
- Bâti du réducteur, droit;
- Palier de roulement de l'arbre entraînant, côté de l'arbre de sortie;
- Palier de roulement de l'arbre entraînant, côté anti-recul;
- Arbre d'entrée;
- Engrenage d'entrée;
- Arbre intermédiaire;
- Palier de roulement de l'arbre intermédiaire, côté de l'arbre de sortie;
- Palier de roulement de l'arbre intermédiaire, côté anti-recul;
- Ainsi de suite pour toutes les composantes du réducteur.

Si les données du fabricant n'étaient pas disponibles, la décomposition en détail devrait alors être menée. Sauf que pour mener une analyse quantitative, les critères de conception de la composante et de ces éléments sont requis. Cette situation pose un problème, car l'accessibilité de ces informations est loin d'être certaine. Toutefois, l'analyse qualitative amènera le concepteur à visualiser les points critiques de la composante, comme pour l'exemple du réducteur de vitesse. L'analyse qualitative menée fait ressortir les quelques points particuliers présentés au tableau 4-4.

Tableau 4-4 Résumé de l'analyse qualitative

COMPOSANTES	POINTS À SURVEILLER	COMMENTAIRES
Joints d'étanchéité	Configuration en fonction de l'environnement; Accessibilité; Facilité de mise en place; Etc.	Le type de joint devra être sélectionné selon l'environnement de travail du réducteur.
Bâti du réducteur	Matériaux disponibles; Rigidité du bâti; Capacité à dissiper la chaleur; Logement des roulements; Possibilité de vérifier facilement la qualité de l'huile; Etc.	Influence sur les tolérances de montage et sur la durée de vie du réducteur. Un bâti peu rigide permettra des interférences entre les engrenages, ce qui aura pour effet d'augmenter l'usure.
Roulements	Type de roulement	Un roulement à rouleaux aura une plus grande résistance qu'un roulement à billes.
Arbres	Rigidité; Accessibilité; Montage des engrenages; Etc.	
Engrenages	Type d'engrenage; Matériaux utilisés.	Comparaison de l'efficacité. Vérification de la résistance à l'usure dans les conditions d'opération définies dans le cahier des charges.

Dans le cas du moteur électrique ou d'autres composantes communes, les bases de données génériques proposent des modèles mathématiques de fiabilité, ce qui permet d'éviter la décomposition en éléments de base.

4.2.6 Arbre de défaillance

Suite à la réalisation de l'AMDE, l'arbre de défaillance du convoyeur à courroie fut construit. La figure 4-5 donne un aperçu de l'arbre. L'annexe V présente l'ensemble de l'arbre de défaillance. Les données statistiques nécessaires à la quantification des arbres de défaillance proviennent de deux sources principales. La première source étant les bases de données génériques. La seconde source provient de l'analyse des données propres à un système similaire en opération dans un même milieu. Les bases de données génériques représentent un bon point de départ lors des analyses : cependant, le concepteur aura avantage à actualiser ces valeurs avec des données réelles provenant des équipements mis en opération.

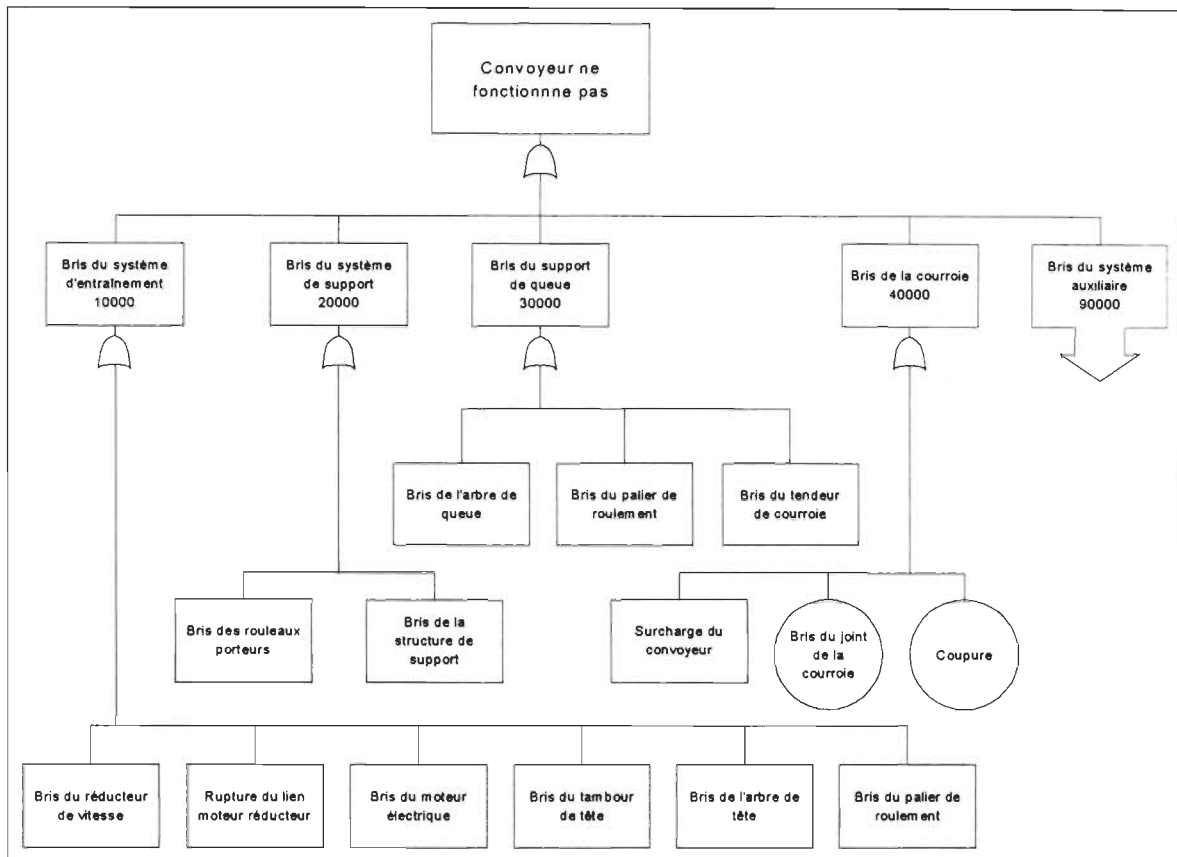


Figure 4-5 Arbre de défaillance du convoyeur

Suite à la construction et à l'analyse des arbres de défaillance, nous pouvons observer trois familles de problématique. La première famille ayant comme particularité les propriétés intrinsèques des composantes elles-mêmes, c'est-à-dire que la fiabilité de la composante est fonction de sa conception. Dans cette famille, les paramètres de condition de charge, de durée de vie désirée, etc., seront pris en compte. Les données d'analyse propres à ce premier groupe sont généralement disponibles, soit par l'entremise des manufacturiers, par l'analyse de données sur des équipements similaires ou par la consultation de bases de données génériques. La deuxième famille prendra en considération les conditions d'entretien des équipements. Les facteurs pouvant influencer la qualité de l'entretien sont la qualification et les habiletés du personnel, le niveau de formation, la philosophie de maintenance de l'entreprise et la connaissance des équipements.

La troisième famille, pour sa part, traitera des causes de bris extérieurs à l'équipement, telles que les impacts mécaniques résultant d'un accident comme un convoyeur heurté par un chariot élévateur. Ce dernier groupe présente un niveau de subjectivité plus important que celui des deux autres familles. Dans ce cas, une probabilité de risque devra être déterminée par une technique d'analyse de risque. La figure 4-6 donne un exemple des trois types d'information fournie par l'arbre de défaillance.

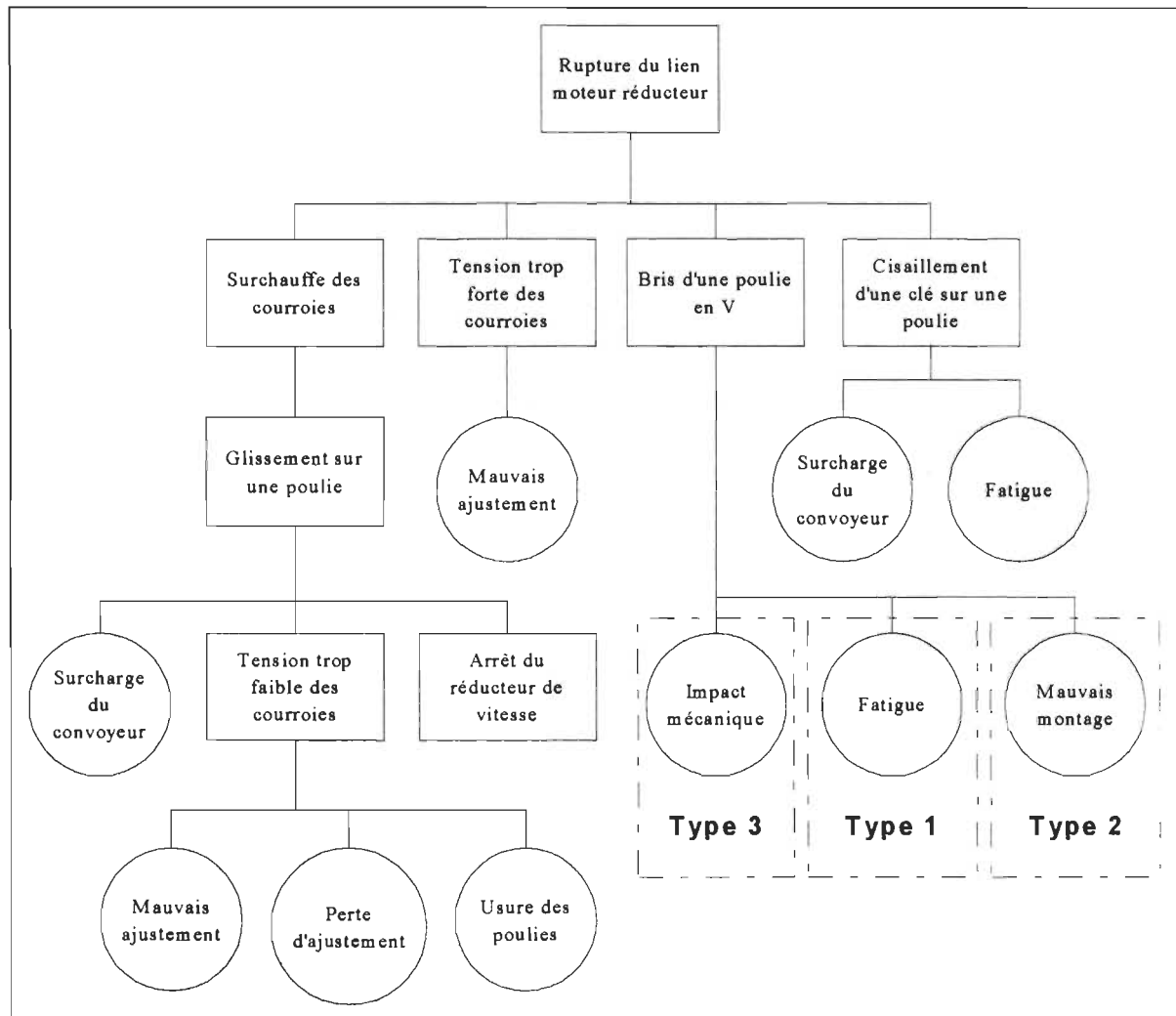


Figure 4-6 Arbre de défaillance, lien moteur/réducteur

4.2.7 Comparaison avec les données de base et les critères de conception

L'analyse de la capacité du convoyeur devrait faire ressortir une valeur supérieure à celle demandée par le client. Cet état de fait provient de l'incertitude de la méthode de calcul de même que de la marge de sécurité du concepteur. Cette marge sera donnée par le degré d'incertitude face aux données de conception et par la variabilité du procédé.

L'analyse de la capacité pourrait se faire en inverse de la conception initiale ou par le résumé des conclusions de conception. Le tableau 4-5 présente des points importants de conception du convoyeur. Remarquons qu'il y a toujours un écart entre la valeur théorique et la valeur retenue.

Tableau 4-5 Vérification de la conception

POINTS DE VÉRIFICATION	VALEURS MINIMALES THÉORIQUES	VALEURS RETENUES POUR LA FABRICATION OU LA POURSUITE DE LA CONCEPTION
Vitesse de la courroie du convoyeur	Vitesse maximale recommandée, 550 ppm (pieds par minute)	Vitesse calculée, 450 ppm
Puissance d'entraînement	45 Hp	50 Hp
Durée de vie des roulements	$C_{90} \text{ min} = 3501 \text{ h}$	$C_{90} = 5999 \text{ h}$

L'application d'une telle méthode permettra au concepteur d'identifier des erreurs de calcul commises lors de la conception et de résumer, dans un seul tableau, les données importantes de conception; il s'agit en réalité d'une auto vérification.

4.2.8 Points faibles de l'équipement

L'analyse de l'arbre de défaillance fait ressortir le ou les sous-systèmes les moins fiables. La valeur R de 83.42% du système d'entraînement dénote que le concepteur doit porter une attention particulière à cet élément. Suite à ce type d'analyse, le concepteur sera en mesure de bien sélectionner les composantes en regard de la fiabilité désirée.

4.3 ANALYSE DE MAINTENANCE

Suite à l'analyse de fiabilité, le concepteur sera en mesure d'identifier les équipements ou les composantes d'un équipement qu'il est impossible de modifier afin de rencontrer les objectifs de disponibilité. Si la fiabilité ne peut pas être améliorée, la seule façon d'augmenter la disponibilité de l'équipement sera alors de réduire les temps d'arrêt pour la remise en opération de l'équipement lors d'un bris. L'analyse de la maintenance se présente alors comme la suite logique à l'analyse de fiabilité. La connaissance de l'équipement étant indispensable pour faire un entretien adéquat, le concepteur aura avantage à reprendre les analyses précédentes comme point de départ.

4.3.1 Méthodes d'analyse

L'AMDE et l'analyse faites par arbre de défaillance identifieront les composantes les plus sensibles ou les moins fiables. Dans l'exemple du convoyeur à courroie, l'analyse a démontré que le système d'entraînement représentait une composante critique du système. Ce constat aurait aussi pu être fait suite à la construction de l'arbre fonctionnel.

Suite à l'identification d'une composante critique, le concepteur sera appelé à en faire une analyse plus poussée. Le type d'analyse dépendra de la composante. Dans le cas où le concepteur aurait à sélectionner la composante parmi plusieurs types de produits, l'analyse multicritère sera un bon outil d'analyse. Prenons l'exemple d'un réducteur de vitesse. Les manufacturiers de réducteurs de vitesse proposent une panoplie impressionnante de produits ayant des caractéristiques variables avec une fonction unique, celle de transmettre la puissance.

Les réducteurs de vitesse varient selon le type d'engrenage ou selon l'agencement des engrenages à l'intérieur du bâti. L'analyse pourra porter sur des critères tels que l'encombrement, la durée de vie, ou selon d'autres critères comme vu au tableau 4-6. L'intégration de facteurs de maintenance tels que la disponibilité des pièces de rechange ou le temps de remplacement requis devrait être faite lors de cette étape.

Tableau 4-6 Grille d'évaluation des réducteurs de vitesse

CRITÈRES	PONDÉRATION, FACTEUR MULTI- PLICATIF	RÉDUCTEUR DE TYPE <i>SHAFT</i> <i>MOUNT</i>		RÉDUCTEUR À ENGRENAGE HÉLICOÏDAL DE TYPE <i>FOOT</i> <i>MOUNT</i>	
		Pointage	Total	Pointage	Total
	A	B	A x B	C	A x C
Disponibilité du réducteur. Délai de livraison.	5	8	40	10	50
Montage et alignement du réducteur sur l'équipement.	20	10	200	6	120
Coût des pièces de rechange.	5	8	40	7	35
Utilisation sur d'autres convoyeurs à l'intérieur de l'usine, interchangeabilité.	15	10	150	8	120
Utilisation d'outillage spécialisé.	5	10	50	7	35
Manuel d'opération et d'entretien, clarté et facilité d'utilisation.	5	10	50	10	50
Accessibilité et interférence. Nécessité de démonter d'autres composantes pour faire le remplacement.	15	7	105	9	135
MTTR, si disponible.	5	8	40	8	40
MTTF, si disponible.	5	0	0	0	0
Système d'auto diagnostic.	10	0	0	0	0
Facilité de détection d'un bris.	10	7	70	7	70
Autres facteurs.	10	5	50	5	70
Sous-total			795		725
Pondération en fonction de l'analyse de risque			x 1		x 1
Total			795		725

L'exemple précédent fait ressortir que le réducteur de vitesse de type « *shaft mount* » serait mieux adapté à l'application. Quoique l'exemple paraisse simpliste, il implique que la pondération des critères d'analyse et leurs sélections furent exécutées par un groupe de travail. Ce qui implique des efforts importants pour une entreprise, d'où l'importance de cibler les équipements critiques afin de s'attaquer à la problématique réelle de l'entreprise et ainsi éviter le gaspillage de temps et d'argent. De plus, si l'analyse révèle que le concept ne répond pas aux exigences de départ, des efforts supplémentaires seraient alors requis afin de modifier le concept ou de réduire les temps d'intervention lors d'un arrêt, ce qui impliquerait alors une révision de la conception de l'équipement, d'où l'importance de procéder par une approche horizontale par opposition à l'approche verticale.

Lorsque les données de départ ne sont pas disponibles, tel le MTTR, il faut se référer aux bases de données génériques et aux ouvrages spécialisés. Par exemple IEEE présente un ouvrage résumant des études de fiabilité sur les composantes électriques [10], il existe aussi des ouvrages [20] traitant des composantes mécaniques normalement rencontrées dans les industries.

4.3.2 Mesure de performance

Tout comme pour la fiabilité d'un système, les données statistiques permettront de mesurer les performances de la fonction maintenance dans l'industrie. Le temps d'intervention, la durée de l'intervention et la fréquence des interventions sont des exemples de mesures quantitatives de la maintenance. De plus, rappelons que la maintenabilité est un élément indissociable de l'équation de la disponibilité.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 RÉCAPITULATION

L'analyse de la fiabilité et de la maintenabilité représente une valeur ajoutée à un équipement ou à un produit, ce qui s'intègre parfaitement dans une philosophie d'amélioration de la qualité. La cueillette de données de base représente le point de départ de la conception. Le cahier des charges, résultat de cette première étape, permettra au concepteur de connaître et de maîtriser les demandes de son client. La normalisation des composants commerciaux réduira pour sa part les inventaires de pièces et la formation requise lors de l'utilisation de nouveaux produits. La maîtrise des fonctions de l'équipement se fera par la construction de l'arbre fonctionnel. Suite à la compréhension des fonctions principales de celui-ci, l'analyse des modes de défaillance permettra d'identifier et d'approfondir les mécanismes de bris et conduira à la schématisation en arbre de défaillance des causes de ces bris. L'application de la méthodologie amènera ensuite le concepteur aux étapes de validation des fonctionnalités de l'équipement. Cette validation aura la forme d'une évaluation de maintenabilité et d'une analyse de conception. Elle aura pour objectif de s'assurer que le produit (l'équipement de production) livré au client soit conforme au cahier des charges. De plus, l'analyse aidera à mettre en relief les composants critiques du point de vue de la performance machine.

L'utilisation de la méthode de travail fera ressortir les points faibles des composants de l'équipement. Ce qui permettra au concepteur d'adopter une approche proactive envers son client. Divers avenant seront alors possible tel que la modification du concept ou la mise en place de mesure de surveillance de l'équipement. Ce type d'action n'est pas possible lors de l'utilisation des méthodes usuelles de conception.

5.2 DISCUSSION

La base de l'analyse repose sur les critères de conception découlant des besoins du client. Il s'avérera fort coûteux pour un client d'acquérir un équipement de très haute qualité si son procédé ne le requiert pas. L'analyse des besoins est fondamentale et devrait faire partie intégrante des étapes de conception afin de déterminer le niveau de fiabilité requis et le type de maintenance à prescrire.

Pour un équipement placé sur le chemin critique d'un produit et qui doit opérer en continu, la fiabilité et la maintenabilité représentent alors un atout majeur. Cependant, pour un équipement de production ayant des temps d'arrêt fréquents, l'effort pouvant être mis dans la réduction importante des temps de maintenance serait moins rentable. Les critères de conception servant de base à la conception d'un produit devront être consignés dans un cahier des charges. L'information contenue dans le cahier des charges devra être mise à jour tout au long du projet, être disponible et largement diffusée aux membres de l'équipe de conception. Il s'agit en fait de la base de la conception.

L'optimisation d'un concept passera par la validation dynamique du produit en regard des exigences du cahier des charges, c'est-à-dire que le concepteur devra s'assurer que le produit répond aux exigences du client. Il va de soi qu'il serait impossible de parler d'optimisation si le produit ou l'équipement n'est pas analysé dans l'environnement dans lequel il devra être mis en opération, d'où l'importance du diagramme d'écoulement et de la connaissance des paramètres d'opération. La validation dynamique requiert une vérification rigoureuse des concepts élaborés tout au long du processus de conception, c'est-à-dire que les concepts doivent être vérifiés périodiquement pour s'assurer que l'équipement répondra bien à la demande, et ce, afin d'éviter de perdre de vue l'objectif. Notons que les critères de conception ne sont pas statiques, mais qu'ils peuvent évoluer. La communication entre l'équipe de conception et le client devient dès lors très importante car si le concepteur modifie les critères de conception, le client doit donner son aval.

La mise en place de la méthodologie est assujettie à l'acceptation de l'augmentation initiale des coûts de la conception. Cette augmentation sera du principalement à la formation du personnel technique et aux analyses supplémentaires requises par la méthodologie.

5.3 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Tel que vu dans ce document, l'analyse de fiabilité et de maintenabilité peut se faire en utilisant les mêmes outils de départ. Le transfert de connaissance entre les membres de l'équipe de conception est plus facile lorsque le processus est en cours, par opposition au transfert de connaissance une fois la conception terminée.

De plus, puisque l'objectif est de fournir un équipement qui idéalement présente une disponibilité de 100%, la séparation des deux éléments de l'équation de la disponibilité n'est pas envisageable. Rappelons que le processus de conception est un processus dynamique qui exige une maturité et une ouverture d'esprit de l'équipe, surtout lorsqu'un retour en arrière dans la conception est nécessaire. Dans un tel cas, des frustrations pourraient faire leur apparition.

Il s'avère primordial d'intégrer les concepts de fiabilité et de maintenabilité le plus tôt possible dans le processus afin d'éviter les résistances naturelles aux changements, car ces approches représentent plus une philosophie de conception que des techniques de travail proprement dites.

Les techniques étant connues, le défi réside dans l'intégration des méthodes décrites ci-dessus dans la dynamique naturelle de la conception.

Suite à la mise en application de la méthodologie, le concepteur disposera d'informations précieuses sur son équipement et sur ses composantes. La construction d'une base de données représenterait une étape consécutive au présent mémoire. De plus, l'établissement d'un lien de communication entre les utilisateurs et le concepteur

permettrait aux deux parties de tirer profit de l'expérience de l'autre, c'est-à-dire que l'utilisateur disposerait d'une source d'information fiable sur les capacités de l'équipement et que le concepteur serait à même de visualiser les performances de celle-ci.

Il va de soi que la méthodologie ne doit pas être appliquée sans la possibilité de faire des modifications. Le caractère innovateur de cette technique tient dans son adaptabilité, selon le contexte, des outils autres que ceux mentionnés pourraient être intégrés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Blanchard Benjamin, S et Fabrycky, Walter J., Systems Engineering and analysis; Prentice Hall International, Upper Saddle River, NJ; 1998, 3th ed., pp 389-390.
- [2] Celik, Cafer; Burnak, Nimetullah, A systemic approach to the solution of the design optimization problem, Total Quality Management; Abingdon, Feb 1998, v.9, i.1, pp 101-108.
- [3] Clemens, P. L., System safety in design practice: Two work models compared, Professional Safety, Park Ridge, Nov 1999, v 44, i 11, pp 33-35.
- [4] Dax, Mark, Failure analysis prevents disaster recurrence, Reseach & Development, Barrington, Dec, 1997, v 39, i 13, pp 30-32.
- [5] Davies, Elwyn C, Quality in design & the integration of quality systems, Management Services, Enfield; Apr 1999; v.43; i.4; pp20-22.
- [6] Lagacé, Denis; Notes de cours, Gestion d'implantation des nouvelles technologies, UQTR, automne 1999.
- [7] Fuller Neil, The house of quality, Supply Management; Jan 29 1998, v.3, i.3, pp 44-45.
- [8] Goldberg B.E., Everhart K., Stevens R., Babbitt III N., Clemens P. and Stout L., System Engineering Toolbox for Design-Oriented Engineers, NASA Reference Publication 1358, Alabama, Dec, 1994.
- [9] Idhammar, Christer, What constitutes world-class maintenance?, Pulp & Paper; San Francisco, Jan 1998, v 72, i 1, pp 43.
- [10] IEEE, Recommanded practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems, IEEE std 493-1990.
- [11] James A Young III, Constructability in the design firm, Cost Engineering, Morgantown, Feb 1998, v40, i 2, pp 33-35.
- [12] Kumar, Ajay; Analysis system safety; Pollution Engineering; Newton; June 2000; v 32; i 6; pp 46-49.
- [13] Ledet, Winston J., Engaging the entire organization key to improving reliability, Oil & Gas Journal, Tulsa, May 24, 1999, v 97, i 21, pp 54-57.
- [14] Lewis E.E., Introduction to reliability engineering, Wiley, New York, 1987, pp 270.
- [15] MIL-STD-721, Definition of effectiveness terms for reliability, maintainability, human factors and safety, Department of defense, Washington, D.C.
- [16] Mancini, Ron, Time-tested tricks find hidden failure modes, EDN, Boston, Oct 22, 1998, v 43, i 22, pp 30.
- [17] Pflueger, Karl H., Power-supply reliability: a practical improvement guide, EDN, Boston, March 3, 1997, v 42, i 5, pp 151-156.
- [18] Prasap, Biren; Review of QFD and related deployment techniques, Journal of Manufacturing Systems; Dearborn, 1998, v.17, i.3, pp 221-234.

- [19] Richard Scott JDW Naval Editor London, DERA puts integrated mast concept to the test, Jane's Defence Weekly, Horley, May 5, 1999, v 31, i 18, pp 1.
- [20] Rothbart, Harold A., Mechanical design and systems handbook, McGraw-Hill, New York, 1964.
- [21] Shafer, Sean, Fast-tracking moldmaking, Molding Systems, Dearborn; Oct 1999; v.57, i. 10, pp 20-23.
- [22] Thompson, Dr Graham; Improving Maintainability and reliability through Design, Professional Engineering Publishing, Chippenham, Wiltshire, UK; 1st ed., 1999.

ANNEXE I

DONNÉES DE BASE

Tableau I-1 Formulaire de cueillette des données de base

DONNÉES DE BASE			DATE	
IDENTIFICATION DU PROJET		NO DE RÉFÉRENCE		
CLIENT		RESPONSABLE CLIENT		
TITRE DU PROJET		CHARGÉ DE PROJET		
DESCRIPTION DU PROJET				
TYPE D'INDUSTRIE		NOTES PAR RAPPORT À L'INDUSTRIE		
<input type="checkbox"/> Industrie lourde				
<input type="checkbox"/> Industrie minière				
<input type="checkbox"/> Industrie nucléaire				
<input type="checkbox"/> Industrie chimique				
<input type="checkbox"/> Industrie forestière				
<input type="checkbox"/> Industrie manufacturière				
CONDITIONS D'OPÉRATION				
ENVIRONNEMENT	NOTES	TEMPS D'OPÉRATION		
<input type="checkbox"/> Intérieur		Heure d'opération / relève		
<input type="checkbox"/> Extérieur		Nombre de relève / jr		
<input type="checkbox"/> Équipement mobile		Jr d'opération / sem.		
<input type="checkbox"/> Immersion, détailler		Sem. d'opération / an		
<input type="checkbox"/> Corrosif, spécifiez		AUTRES PARAMÈTRES		
<input type="checkbox"/> Poussière explosive, spécifiez		Température minimale		C ou F
<input type="checkbox"/> Poussière abrasif, spécifiez		Température maximale		C ou F
<input checked="" type="checkbox"/> Autres poussières, spécifiez		Température de conception		C ou F
<input type="checkbox"/> Explosive, voir code de l'électricité du Québec				
<input type="checkbox"/> Radioactive				
<input type="checkbox"/> Humidité, spécifiez				
<input type="checkbox"/> Vibration, spécifiez				
COMMENTAIRES :				

Tableau I-2 Exemple de données de base, convoyeur à courroie

DONNÉES DE BASE			DATE	2001-02-07
IDENTIFICATION DU PROJET		NO DE RÉFÉRENCE	6001-001	
CLIENT	Entreprise XYZ	RESPONSABLE CLIENT		
TITRE DU PROJET	Transfert de coke de pétrole	CHARGÉ DE PROJET	Pierre Paquin, ing.	
DESCRIPTION DU PROJET				
TYPE D'INDUSTRIE		NOTES PAR RAPPORT À L'INDUSTRIE		
<input checked="" type="checkbox"/> Industrie lourde	Zone de transbordement	Temps d'arrêt entre les transbordements		
<input type="checkbox"/> Industrie minière				
<input type="checkbox"/> Industrie nucléaire				
<input type="checkbox"/> Industrie chimique				
<input type="checkbox"/> Industrie forestière				
<input type="checkbox"/> Industrie manufacturière				
CONDITIONS D'OPÉRATIONS				
ENVIRONNEMENT	NOTES	TEMPS D'OPÉRATION		
<input checked="" type="checkbox"/> Intérieur		Heure d'opération / relève	8	heures
<input type="checkbox"/> Extérieur		Nombre de relève / jr	3	
<input type="checkbox"/> Équipement mobile		Jrs d'opération / sem.	5	
<input type="checkbox"/> Immersion, détailler		Sem. d'opérations / an	40	
<input type="checkbox"/> Corrosif, spécifiez		AUTRES PARAMÈTRES		
<input type="checkbox"/> Poussière explosive, spécifiez		Température minimale	-30	C
<input checked="" type="checkbox"/> Poussière abrasive, spécifiez		Température maximale	30	C
<input checked="" type="checkbox"/> Autres poussières, spécifiez	coke de pétrole, alumine	Température de conception	selon min/max	
<input type="checkbox"/> Explosive, voir code de l'électricité du Québec				
<input type="checkbox"/> Radioactive				
<input type="checkbox"/> Humidité, spécifiez				
<input type="checkbox"/> Vibration, spécifiez				
COMMENTAIRES : Niveau de maintenance moyen, entretien correctif et lubrification selon un programme établi préalablement				
Dépoussiéreur en place, prévoir raccordement aux endroits critiques				

ANNEXE II

NOTES DE CALCUL

Les notes de calculs ci-dessous sont une copie du fichier informatique utilisant le logiciel de calcul Matcad version 8.

Les annotations telles que le symbole d'égalité sont propres au logiciel.

Le logiciel étant anglais, les accents ne sont pas permis dans les formules.

Projet : Fiabilité d'un convoyeur à courroie

Vérifié par :

DATE : 00/00/00

Description : Convoyeur à courroie

CALCUL DE BASE POUR LE DÉPLACEMENT DU PRODUIT

Produit : coke de pétrole calciné

$$\rho := 35 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \quad \rho, \text{ densité du produit, lb/pi}^3$$

$$L_g := 150 \cdot \text{ft} \quad L_g, \text{ longueur horizontale, en pied}$$

$$C_{\text{nom}} := 700 \cdot \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \quad C_{\text{nom}}, \text{ capacité nominale du convoyeur, en Tonne/h}$$

$$C_{\text{max}} := 1100 \cdot \frac{\text{ton}}{\text{hr}} \quad C_{\text{max}}, \text{ capacité maximale du convoyeur, en Tonne/h}$$

$$V_{\text{mr}} := 550 \cdot \text{ppm} \quad V_{\text{mr}}, \text{ vitesse maximale recommandée, en pi/min}$$

Selon la table 21 de Link Blet, p. 1022

$$L_{\text{cour}} := 48 \cdot \text{in} \quad L_{\text{cour}}, \text{ largeur de courroie, en pouce}$$

Utilisation de rouleaux porteurs en auge à 45 degrés avec longueur de rouleaux constante

$$C_{\text{roul}} := 139.8 \cdot \frac{\text{ft}^3}{\text{hr} \cdot \text{ppm}} \quad C_{\text{roul}}, \text{ capacité de ce type de rouleau porteur, en pi}^3/\text{h par ppm de courroie}$$

Selon la table 22 de LinkBelt, p.1023

$$\text{Debit} = 62857 \cdot \frac{\text{ft}^3}{\text{hr}}$$

Débit, nombre de pieds cube par heure nécessaire pour passer le maximum de la production, en pi³/h

$$V_{\text{calcul}} := \frac{\text{Debit}}{\text{Croul}}$$

Vcalcul, vitesse de la courroie du convoyeur, en pi/min

$$V_{\text{calcul}} = 450 \cdot \text{ppm}$$

La valeur obtenue étant inférieure à Vmr donc Vcalcul est acceptable

$$\text{ppm} = \frac{\text{ft}}{\text{min}}$$

$$\text{rpm} = \frac{1}{\text{min}}$$

CALCUL DE LA PUISSANCE REQUISE POUR LE DÉPLACEMENT DU PRODUIT

Définition des variables

Hp, puissance à transmettre par la courroie du convoyeur, en Horse Power

Kt, constante selon la table 1 de Link Belt, p. 971

Lg, longueur horizontale du convoyeur

Vcalcul, vitesse de la courroie

Cmax, Cnom, capacité du convoyeur

Vel, différence de niveau entre l'entrée et la sortie du matériel incluant le déversoir s'il y a lieu

FS, facteur de service

$$K_t := 0.29$$

$$FS := 1.8$$

$$V_{\text{calcul}} = 449.62 \cdot \text{ppm}$$

$$C_{\text{max}} = 1100 \cdot \text{tph}$$

$$\text{tph} = \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

$$C_{\text{nom}} = 700 \cdot \text{tph}$$

$$L_g = 45.72 \text{ m}$$

$$V_{\text{el}} := 10 \cdot \text{ft} \quad \text{Élévation du matériel pour le déversoir}$$

$$H_p := \left[\frac{K_t \cdot \frac{V_{\text{calcul}}}{\text{ppm}} \cdot \left(\frac{L_g}{\text{ft}} + 150 \right)}{10000} + \frac{\frac{C_{\text{max}}}{\text{tph}} \cdot \left(\frac{L_g}{\text{ft}} + 150 \right)}{33000} + \frac{\frac{C_{\text{max}}}{\text{tph}} \cdot \frac{V_{\text{el}}}{\text{ft}}}{990} \right] \cdot FS \cdot \text{hp}$$

$$H_p = 45.04 \cdot \text{hp}$$

$$H_{\text{pr}} := 50 \cdot \text{hp}$$

Utilisation d'un 50 Hp pour éviter la surcharge d'un 40 Hp

CALCUL DE LA TENSION DANS LA COURROIE DE CONVOYEUR

DÉFINITION DES VARIABLES

Te, tension effective, en lbf

T1, tension du côté tendu, en lbf

T2, tension du côté non tendu, en lbf

DF, facteur d'adhérence de la courroie sur le tambour de tête

PIW, tension par pource dans la courroie, en lbf/po

$$Te := \frac{33000 \cdot \frac{Hpr}{hp}}{\frac{Vcalcul}{ppm}} \cdot lbf$$

DF := 0.8 Avec un angle d'enroulement de 180 degré et un tendeur manuel

$$T2 := DF \cdot Te$$

$$\alpha := 180 \text{ deg}$$

$$T1 := T2 + Te$$

$$T1 = 6606 \cdot lbf$$

$$T2 = 2936 \cdot lbf$$

$$PIW := \frac{T1}{Lcour}$$

$$PIW = 137.62 \cdot \frac{lbf}{in}$$

Utilisé pour la sélection de la courroie

$$Frq := 2 \cdot T2$$

$$Fr := (T1 + T2) \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Fr, force résultante sur les roulements de l'arbre de tête

$$Fr = 9541.35 \cdot lbf$$

$$Frq = 5872 \cdot lbf$$

$$Fp := 51 \cdot in$$

Largeur du tambour de tête

$$Ab := 10 \cdot in$$

Distance de portée des roulements de chaque côté du tambour

$$BC := Fp + Ab$$

BC, distance centre/centre des roulements

$$BCMF := BC - Fp$$

$$Pd := 20 \cdot in$$

Pd, diamètre du tambour de tête, en fonction du PIW et du rayon minimal d'enroulement de la courroie

En utilisant la table 3, de Dodge, un diamètre d'arbre peut être sélectionné
 Pour une charge de 8507 lbf et un tambour de 20", un arbre de 3 7/16" de diamètre pourrait être adéquat.

Vérification de l'arbre en torsion

$S_y := 8000 \cdot \text{psi}$ S_y , limite élastique, en psi

$K_b := 2.5$

$N_e := \frac{BCMF}{2}$

$N_e = 5 \cdot \text{in}$

$A_e := N_e + 2.5 \cdot \text{in}$ Variable utilisée selon la méthode de Dodge

$$D_t := \sqrt[3]{\frac{16}{\pi \cdot S_y} \cdot \sqrt{\left(\frac{K_b \cdot A_e \cdot Fr}{2}\right)^2 + \left[(T_1 - T_2) \cdot \frac{P_d}{2}\right]^2}}$$

$D_t = 3.9483 \cdot \text{in}$ Étant donné que $D_t > 3 \frac{7}{16}"$, la variable A_e doit être majorée

Reprendre le calcul avec un diamètre de 3-15/16", ce qui modifie la valeur de A_e

$A_{e1} := N_e + 2.75 \cdot \text{in}$

$$D_{t1} := \sqrt[3]{\frac{16}{\pi \cdot S_y} \cdot \sqrt{\left(\frac{K_b \cdot A_{e1} \cdot Fr}{2}\right)^2 + \left[(T_1 - T_2) \cdot \frac{P_d}{2}\right]^2}}$$

$D_{t1} = 3.9856 \cdot \text{in}$

$D_{tr} := 4 \text{ in}$ D_{tr} , diamètre requis de l'arbre

MOTORISATION DE L'ARBRE DE TÊTE

Rec := 0.5 in Épaisseur de recouvrement sur le tambour de tête, Rec.

Epcour := 0.5 in Epcour, épaisseur de la courroie, devra être modifiée une fois la sélection terminée.

$$\eta_{tete} := \frac{V_{calcul}}{\left(\frac{Pd}{2} + Rec + Epcour\right) \cdot 2 \cdot \pi} \quad \text{Vitesse de rotation de l'arbre de tête}$$

$$\eta_{tete} = 78.06 \cdot \text{rpm}$$

Hypothèse ; T1 et T2 sont parallèles

Froul_x := T1 + T2 Force dans le roulement due à la courroie

$$\text{Froul}_x = 9541.35 \cdot \text{lbf}$$

Pred := 633 lbf Poids du réducteur de vitesse, Pred

Pmot := 500 lbf Poids du moteur électrique

Pacc := 200 lbf Poids des poulies

$$P_{total} := Pred + Pmot + Pacc$$

$$P_{total} = 1333 \cdot \text{lbf}$$

Charge partielle sur les roulements due à Ptotal

OL := 12 in OL, distance d'appui du réducteur sur l'arbre

$$R_1 := \frac{OL}{BC} \cdot P_{total} \quad R_2 := \frac{(BC + OL)}{BC} \cdot P_{total}$$

$$R_1 = 262.23 \cdot \text{lbf}$$

$$R_2 = 1595.23 \cdot \text{lbf}$$

$$RR := [R_1 \quad R_2]$$

$$F_{brg} := \sqrt{\left(\frac{Fr}{2}\right)^2 + (\max(RR))^2} \quad F_{brg}, \text{ force max dans le roulement de l'arbre de tête}$$

$$F_{brg} = 5030 \cdot lbf \quad \text{FORCE RADIALE PURE, PAS D'EFFORT AXIAL RÉPARTI DANS LES DEUX ROULEMENTS DE L'ARBRE DE TÊTE}$$

POUR DES PALIERS DE ROULEMENT DODGE, DÉTERMINER LA CAPACITÉ MIN REQUISE

$$J_{pa} := 360 \text{ day} \quad J_{pa}, \text{ jours par an d'opération}$$

$$H_{pj} := 24 \text{ hr} \quad H_{pj}, \text{ heures par jour d'opération}$$

$$H_{pa} := \frac{J_{pa}}{\text{day}} \cdot H_{pj} \quad H_{pa}, \text{ heures par an d'opération}$$

$$A_n := 4 \quad H_{pa} = 8640 \cdot \text{hr}$$

$$L_{10} := H_{pa} \cdot A_n \quad L_{10}, \text{ durée de vie pour une fiabilité de 90\%}$$

$$L_{10} = 34560 \cdot \text{hr}$$

$$C_{90} := \left(\frac{L_{10} \cdot \frac{\text{rpm}}{\text{hr}}}{1500000} \right)^{0.3} \cdot F_{brg} \quad \text{Selon formule de Dodge}$$

$$C_{90} = 5999 \cdot lbf$$

La valeur obtenue étant inférieure à la capacité du roulement choisie en fonction du diamètre de l'arbre de tête, la durée de vie du roulement sera plus longue que la durée de vie prévue de l'arbre de tête.

$$C2_{90} := \left(\frac{L_{10} \cdot \frac{\text{rpm}}{\text{hr}}}{1500000} \right)^{0.3} \cdot \frac{Fr_q}{2}$$

$$C2_{90} = 3501 \cdot lbf$$

CALCUL DE LA RÉPARTITION DE CHARGE SUR LES ROULEAUX PORTEURS

Esp := 48 in Esp, espacement entre les rouleaux porteurs

$W_{rp} := \frac{\text{Debit}}{V_{\text{calcul}}} \cdot \rho \cdot \text{Esp}$ W_{rp} , charge sur un rouleau porteur

$W_{rp} = 147.96 \text{ kg}$

nbrg := 4 nbrg, nombre de roulements supportant la charge

$W_{brg} := \frac{W_{rp}}{\text{nbrg}}$ W_{brg} , charge par roulement

$W_{brg} = 36.99 \text{ kg}$

Drp := 6 in Drp, diamètre du rouleau porteur

$\omega_{rp} := \frac{V_{\text{calcul}}}{\pi \cdot \text{Drp}}$

$\omega_{rp} = 286.24 \cdot \text{rpm}$ $\text{rpm} = \frac{1}{\text{min}}$

Information relative à la durée de vie des rouleaux porteurs ω_{rp} et W_{brg} .
Ces paramètres devront être pris en compte lors du calcul de la durée de vie des rouleaux porteurs

CALCUL DE L'ARBRE DU TAMBOUR DE QUEUE

Méthode du code ASME

MPa = 1000000 Pa

$S_A_y := 310 \text{ MPa}$

Acier SAE1045 HR

$S_{ut} := 570 \text{ MPa}$

$b := 0.75$

Facteur b , pour tenir compte de la concentration de contrainte

$$S_p := [b \cdot 0.18 \cdot S_{ut} \quad b \cdot 0.30 \cdot S_A_y]$$

$C_m := 1.5$

$C_t := 1.5$

$M_f := 6400 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$

$T_m := 0 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$

$$\text{dia}_q := \sqrt[3]{\frac{5.1}{\min(S_p)} \cdot \sqrt{(C_m \cdot M_f)^2 + (C_t \cdot T_m)^2}}$$

$\text{dia}_q = 3.5 \cdot \text{in}$

Le diamètre de l'arbre sera de 3 15/16 po, portée de roulement, 3 7/16 po

$\text{Dia}_q := 3.9375 \text{ in}$

$$\tau_q := \frac{16}{\pi \cdot \text{Dia}_q^3} \cdot \sqrt{(C_m \cdot M_f)^2 + (C_t \cdot T_m)^2}$$

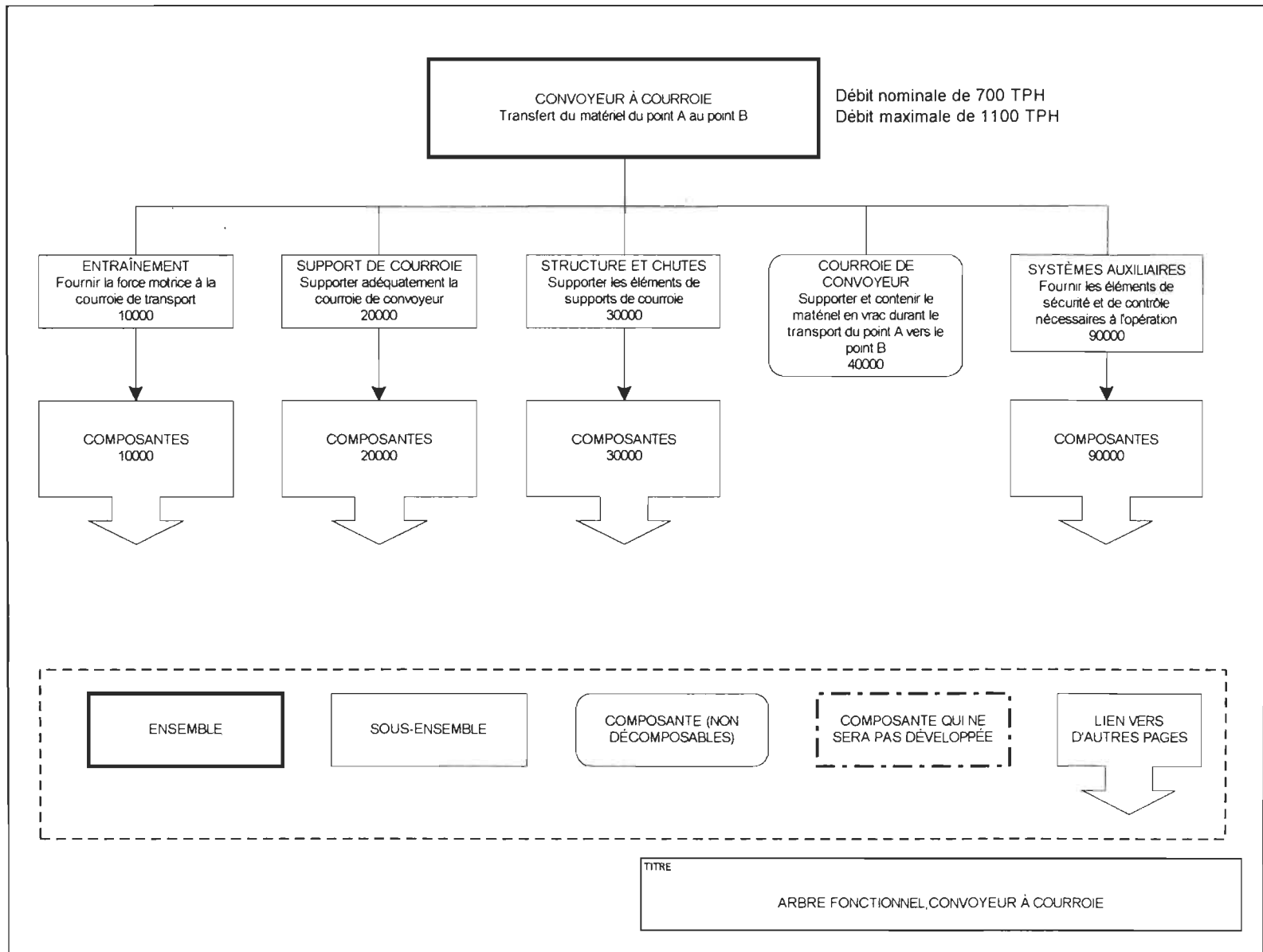
$$\tau_q = 7089 \cdot \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$$

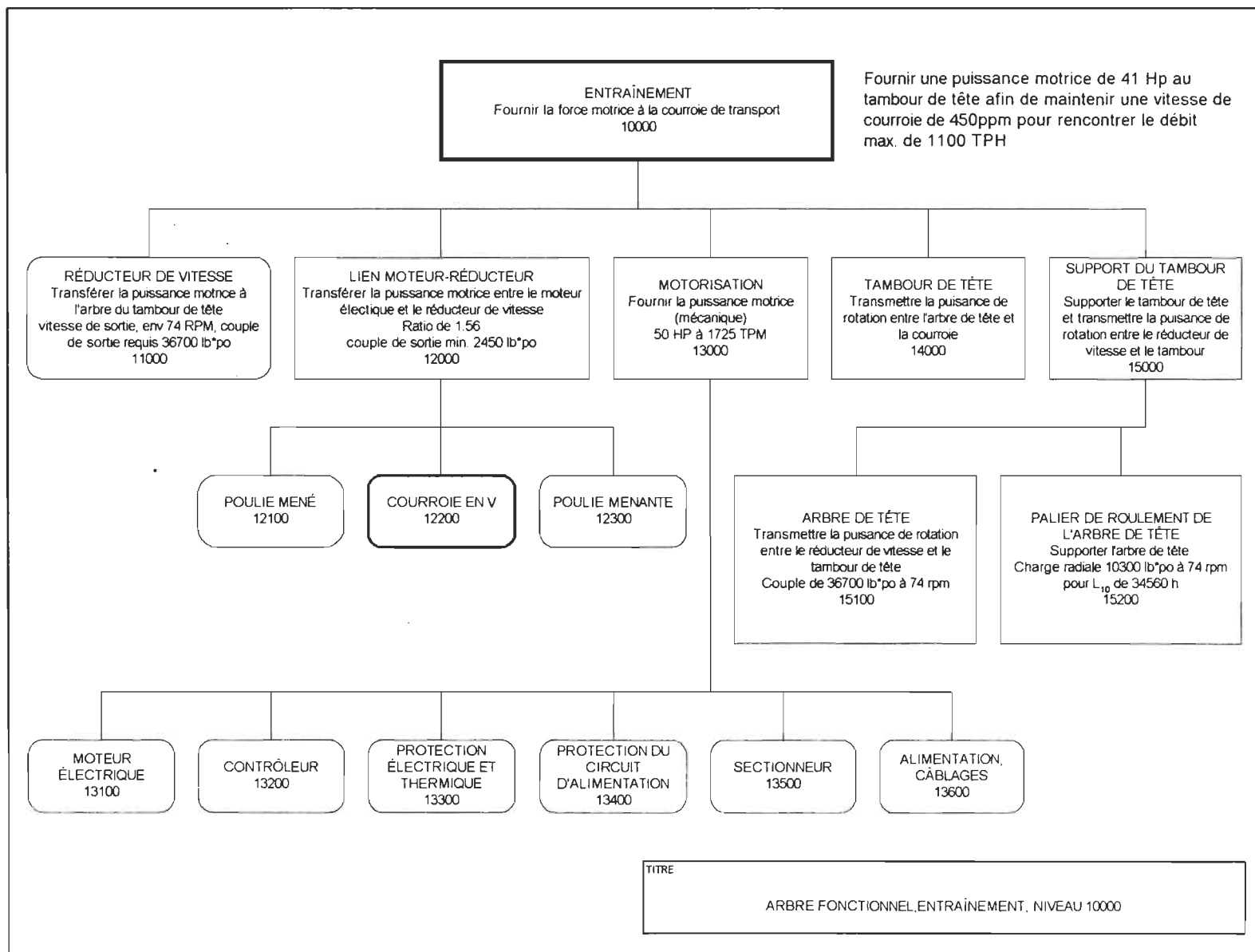
$$\min(S_p) = 10116.38 \cdot \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$$

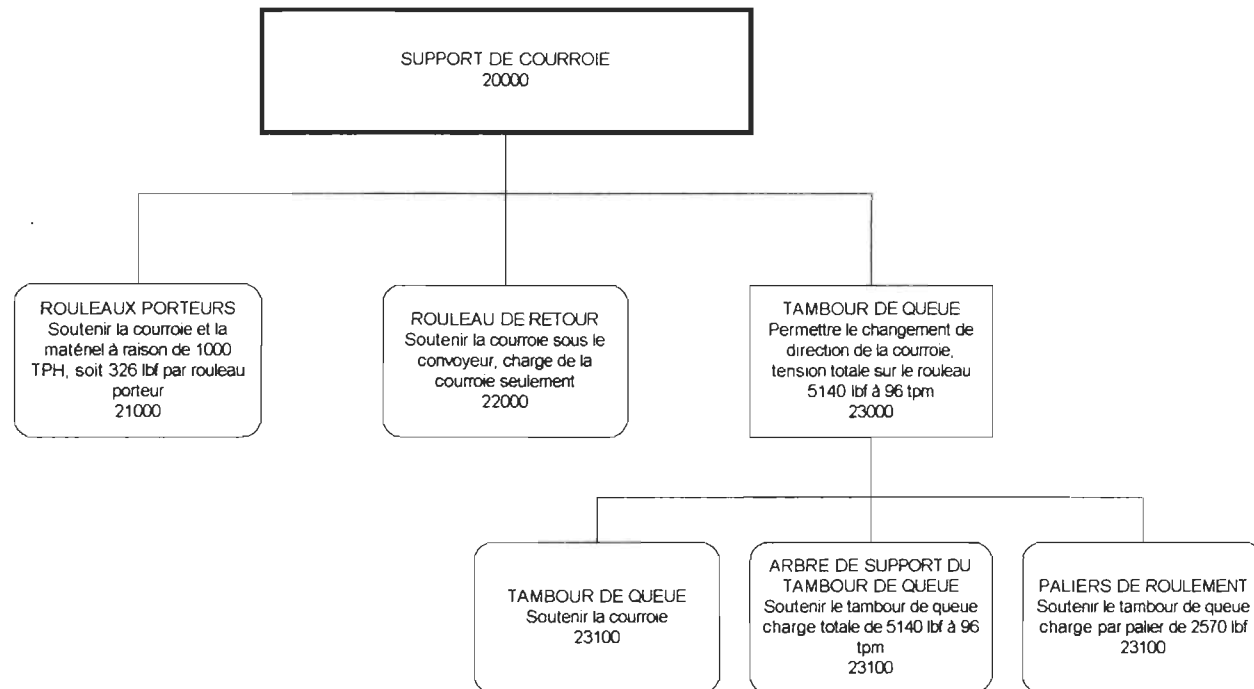
La contrainte 7089 lbf/in^2 sera inférieure à la limite fixée par la valeur minimale de S_p , soit 10116 lbf/in^2

ANNEXE III

ARBRE FONCTIONNEL DU CONVOYEUR

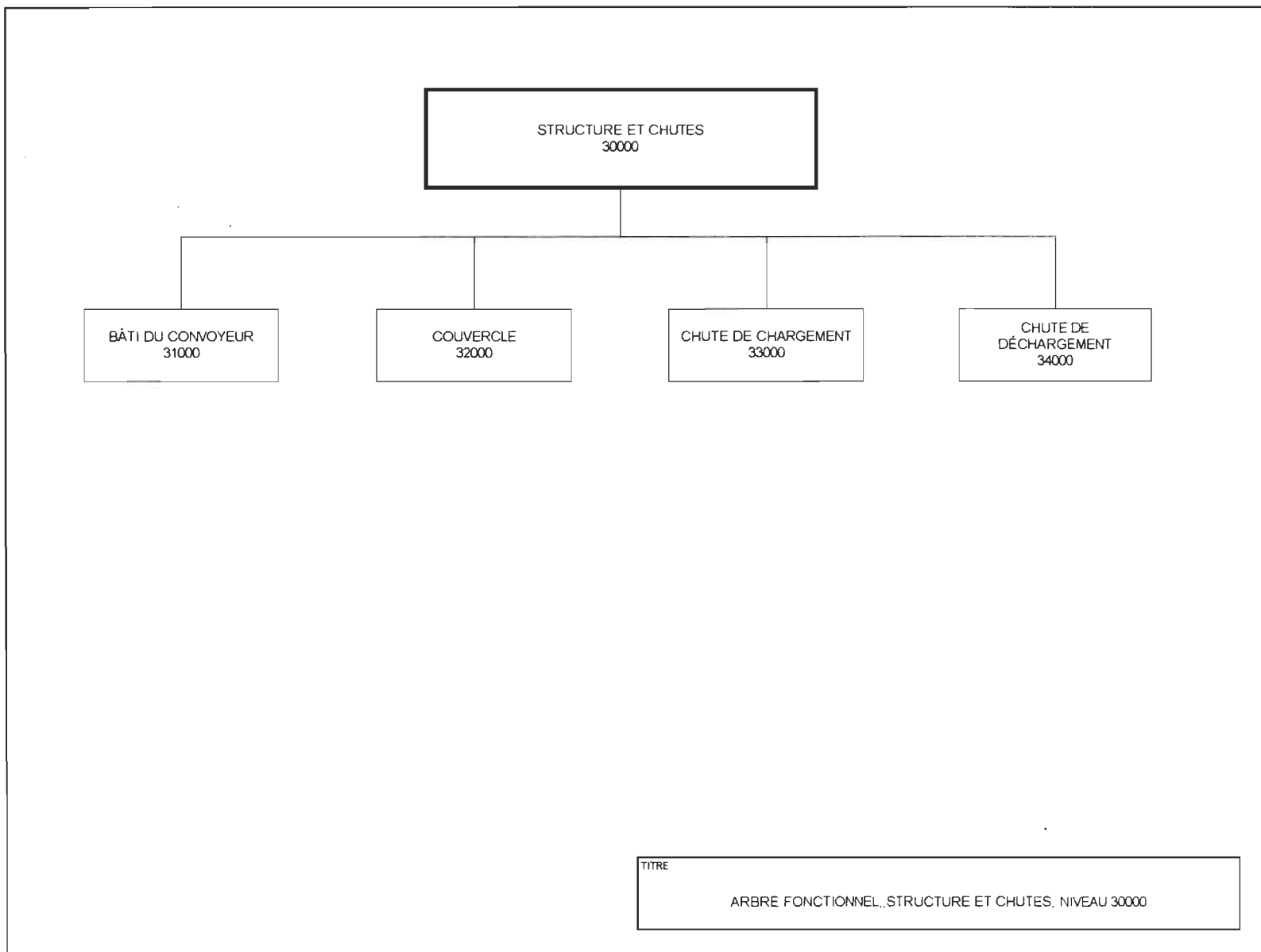


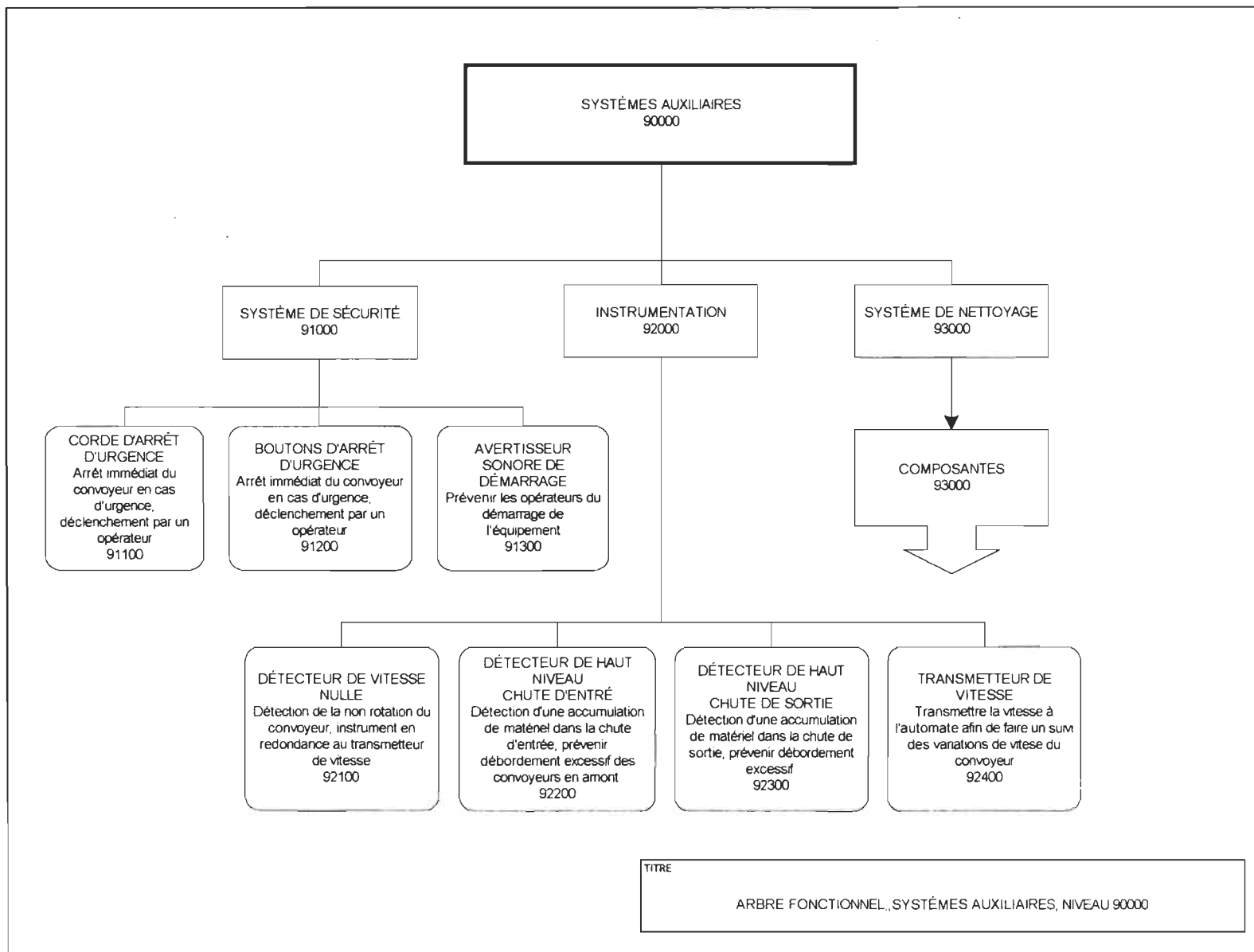


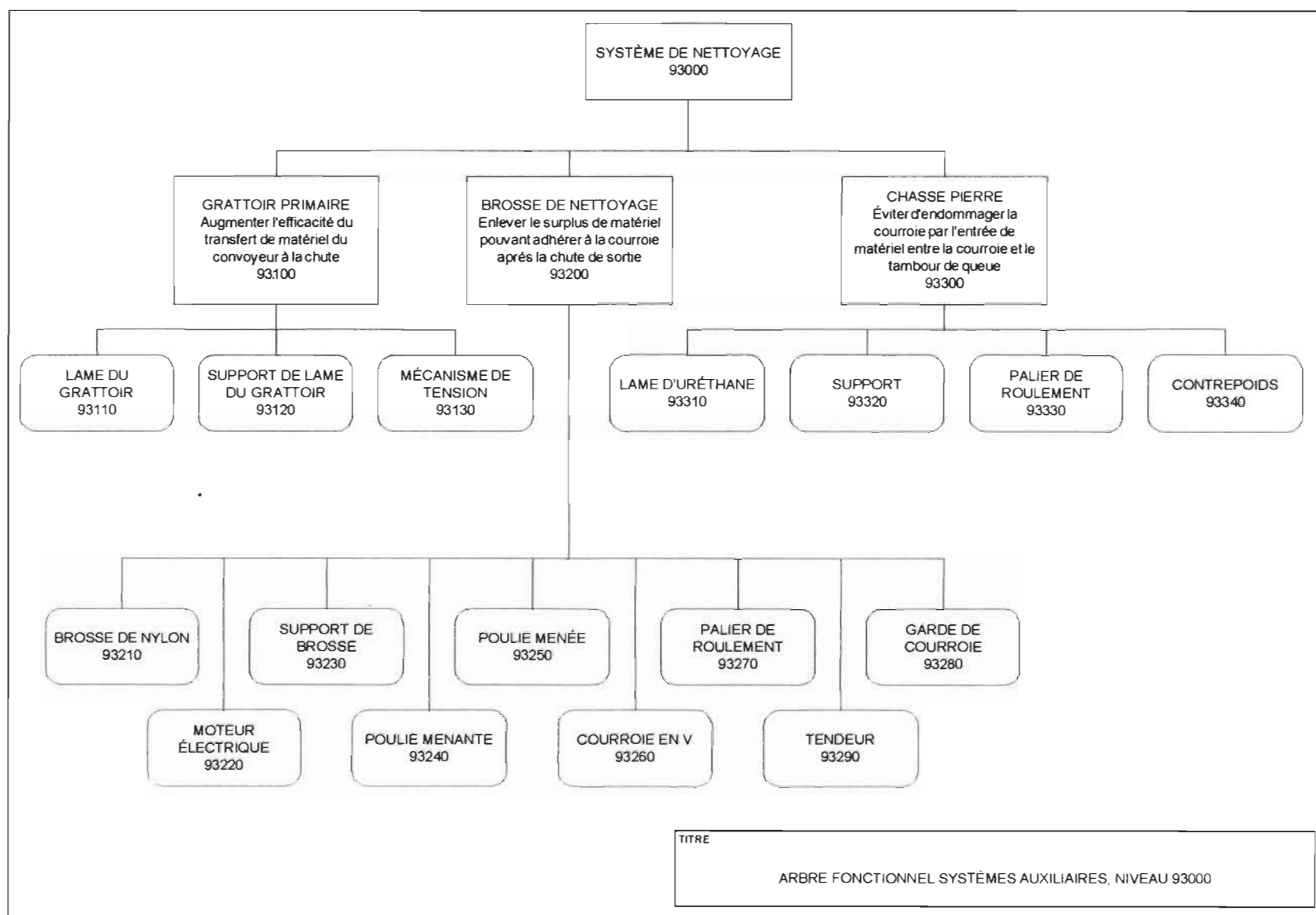


TITRE

ARBRE FONCTIONNEL, SUPPORT DE COURROIE ET COURROIE, NIVEAU 20000







ANNEXE IV

ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE

AMDE

Client		Projet	Lot
Projet, description	CONVOYEUR À COURROIE		Date AMDEC
Responsable de la conception		Révision # et date	
Ensemble	Convoyeur à courroie, 00000		
Sous-ensemble			
Composantes			

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Entraînement, 10000	Fournir la puissance motrice à la courroie	Bris	Arrêt du convoyeur	Bris du réducteur de vitesse	
				Rupture du lien moteur/réducteur	
				Arrêt du moteur électrique	
				Bris du tambour de tête	
				Bris de l'arbre de tête	
				Blocage d'un palier de roulement	
Entraînement, 10000		Ralentissement	Manque de vitesse de la courroie	Ralentissement du moteur électrique	
				Glissement des courroies de transmission de puissance (lien moteur/réducteur)	
				Glissement de la courroie de convoyeur sur le tambour	
				Surcharge du convoyeur	

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Systèmes auxiliaires, 90000	Fournir les éléments de sécurité et de contrôle nécessaires	Bris	Arrêt du convoyeur	Bris de la corde d'urgence	
				Bris du bouton d'arrêt d'urgence	
				Bris du détecteur de haut niveau de la chute d'entrée	
				Bris du détecteur de haut niveau de la chute de sortie	
		Enclenchement	Arrêt du convoyeur	Enclenchement de la corde d'urgence	
				Enclenchement du bouton d'arrêt d'urgence	

Client		Projet	Lot
Projet, description	CONVOYEUR À COURROIE		Date AMDEC
Responsable de la conception		Révision # et date	
Ensemble	Entraînement 10000		
Sous-ensemble	Réducteur de vitesse 11000		
Composantes			

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Roulements	Supporter les arbres de support des engrenages	Usure des roulements	Bruyant	Mauvaise lubrification ou fuite d'huile	
			Augmentation de la température d'opération	Contamination	
			Blocage du réducteur	Surcharge	
			Interférence entre les engrenages	Haute température	
			Vibration excessive	Mauvais montage	
Joints d'étanchéité	Isoler les composantes internes de l'environnement d'opération du réducteur	Usure des joints d'étanchéité	Ingression de poussières ou autres contaminants externes	Environnement ayant des contaminants hostiles ou abrasifs	
			Fuite d'huile	Mauvais montage	

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Engrenages	Transmission de la puissance	Usure des engrenages	Bruyant	Mauvaise lubrification	
			Augmentation de la température d'opération	Contamination	
			Blocage du réducteur	Surcharge	
			Vibration excessive	Haute température	
				Flexion des arbres de support	
				Mauvais montage	
Bâti du réducteur	Supporter les composantes internes et externes du réducteur	Cassure, fissuration	Vibration excessive	Fatigue	
			Ingression de poussières ou autres contaminants externes	Impact externe	
			Fuite d'huile	Surcharge	
				Augmentation de la température d'opération	
				Mauvais montage	
Arbre du réducteur	Supporter les engrenages	Cisaillement	Blocage du réducteur	Augmentation de la température d'opération	
		Fatigue		Surcharge	
		Usure	Interférence entre les engrenages	Élément externe hostile	
				Mauvais montage	

Client		Projet	Lot
Projet, description	CONVOYEUR À COURROIE		Date AMDEC
Responsable de la conception		Révision # et date	
Ensemble	Entraînement, 10000		
Sous-ensemble	Support du tambour de tête, 15000		
Composantes	Palier de roulement, 15200		

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Palier de roulement, 15200	Supporter l'arbre de tête	Blocage du roulement	Arrêt complet du convoyeur	Montage défectueux, mauvais alignement	
			Rupture du bâti du palier	Surchauffe du palier	
			Fissure sur l'anneau de roulement ou sur le rouleau	Contrainte excessive	
				Vitesse excessive	
				Ingression de poussières ou autres contaminants	
		Surchauffe	Contamination de l'huile	Mauvaise qualité de l'huile	
			Contrainte thermique	Étanchéité déficiente	
			Vibration excessive	Perte de lubrification	
				Contraintes excessives	

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Palier de roulement, 15200	Supporter l'arbre de tête	Surchauffe		Étanchéité déficiente, infiltration de contaminant	
				Mauvais alignement, mauvais montage	
				Vitesse excessive	
				Mauvaise dissipation de chaleur	
		Corrosion	Usure des roulements	Étanchéité déficiente	
				Problème d'entreposage	
				Contamination extérieur	
		Fissuration du bâti	Contamination de l'huile	Montage défectueux	
			Ingression de poussières ou autres contaminants	Impact	
			Blocage du roulement	Étanchéité déficiente	

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Palier de roulement, 15200	Supporter l'arbre de tête	Fissuration du bâti	Vibrations excessives	Contraintes excessives	
				Manque de rigidité de la base des paliers	
				Mauvais alignement des paliers	
				Utilisation de deux paliers fixes (sans possibilité d'expansion)	

Client		Projet	Lot
Projet, description	CONVOYEUR À COURROIE		Date AMDEC
Responsable de la conception		Révision # et date	
Ensemble	Entraînement, 10000		
Sous-ensemble	Moteur électrique, 13000		
Composantes	Composantes du moteur, 13400		

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Roulements	Supporter le rotor	Usure des roulements	Bruyant	Mauvaise lubrification	
			Augmentation de la température d'opération	Contamination	
			Blocage du rotor	Surcharge	
			Frottement du rotor sur le stator	Haute température	
		Usure des manchons de roulements (<i>sleeve bearing</i>)	Arrêt du moteur	Surcharge latérale trop importante sur l'arbre du moteur (<i>side load</i>)	
			Frottement du rotor sur le stator	Arrêt et départ fréquents en charge	
			Moteur bruyant	Mauvaise lubrification	
			Haute température		

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Armature	Induire la rotation	Court-circuit ou circuit ouvert	Arrêt du moteur	Haute température	
			Étincelle sur les brosses		
Bâti	Support de l'ensemble et protection mécanique	Cassure	Ingression de poussières ou autres contaminants	Fatigue	
			Court-circuit	Impact extérieur	
			Blocage	Vibration	
Arbre du rotor	Transmission du mouvement de rotation	Cisaillement	Blocage	Fatigue	
		Fissure du rotor (dé laminage)	Frottement du rotor sur le stator	Mauvais alignement	
				Bris des roulements	
Brosses	Transfert du courant électrique sur le rotor	Usure	Vitesse de rotation trop élevée ou trop faible	Mauvaise maintenance	
			Moteur bruyant	Contamination	
			Étincelles excessives	Haute température	
				Mauvaise pression de contact	
				Basse humidité atmosphérique	
		Bris des brosses	Arrêt du moteur	Oxydation des brosses	
Ventilateur	Refroidissement du moteur	Cassure	Augmentation de la température du moteur	Impact mécanique	
		Blocage de l'entrée d'air au ventilateur		Obstruction mécanique	
		Usure, corrosion		Environnement hostile	

Client		Projet	Lot
Projet, description	CONVOYEUR À COURROIE		Date AMDEC
Responsable de la conception		Révision # et date	
Ensemble	Entraînement, 10000		
Sous-ensemble	Tambour de tête, 14000		
Composantes			

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Tambour de tête	Entraîner la courroie de convoyeur	Glissement	Arrêt de la courroie	Surcharge du convoyeur	
			Surchauffe du système	Matériel entre la courroie et le tambour	
				Tension de la courroie trop faible	
				Diamètre du tambour trop faible	
				Surcharge du convoyeur	
		Délaminage du recouvrement	Vibration	Surchauffe du système	
				Mauvais montage du recouvrement	
Tambour de tête				Surcharge du convoyeur	
Tambour de tête		Usure	Glissement de la courroie	Matériel entre la courroie et le tambour	
				Surcharge du convoyeur	

Client		Projet	Lot
Projet, description	CONVOYEUR À COURROIE		Date AMDEC
Responsable de la conception		Révision # et date	
Ensemble	Entraînement, 10000		
Sous-ensemble	Arbre de tête, 15000		
Composantes			

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Arbre de tête	Supporter le tambour de tête et transmettre le mouvement de rotation	Cisaillement	Arrêt du convoyeur	Surcharge du convoyeur	
			Blocage du tambour	Couple de démarrage trop élevé	
				Interférence mécanique	
		Fatigue	Arrêt du convoyeur	Surchauffe du système, température trop élevée	
				Tension de la courroie trop importante	
			Flexion excessive	Surcharge du convoyeur	
				Mauvais ajustement du bras de force du réducteur	

1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Arbre de tête	Supporter le tambour de tête et transmettre le mouvement de rotation	Vibration excessive	Fatigue	Tension de la courroie trop importante	
				Surcharge du convoyeur	
			Flexion	Mauvais ajustement du bras de force du réducteur	
				Bris des roulements	
				Mauvais alignement	
				Impact mécanique	

Client		Projet	Lot
Projet, description	CONVOYEUR À COURROIE		Date AMDEC
Responsable de la conception		Révision # et date	
Ensemble	Courroie, 40000		
Sous-ensemble			
Composantes			

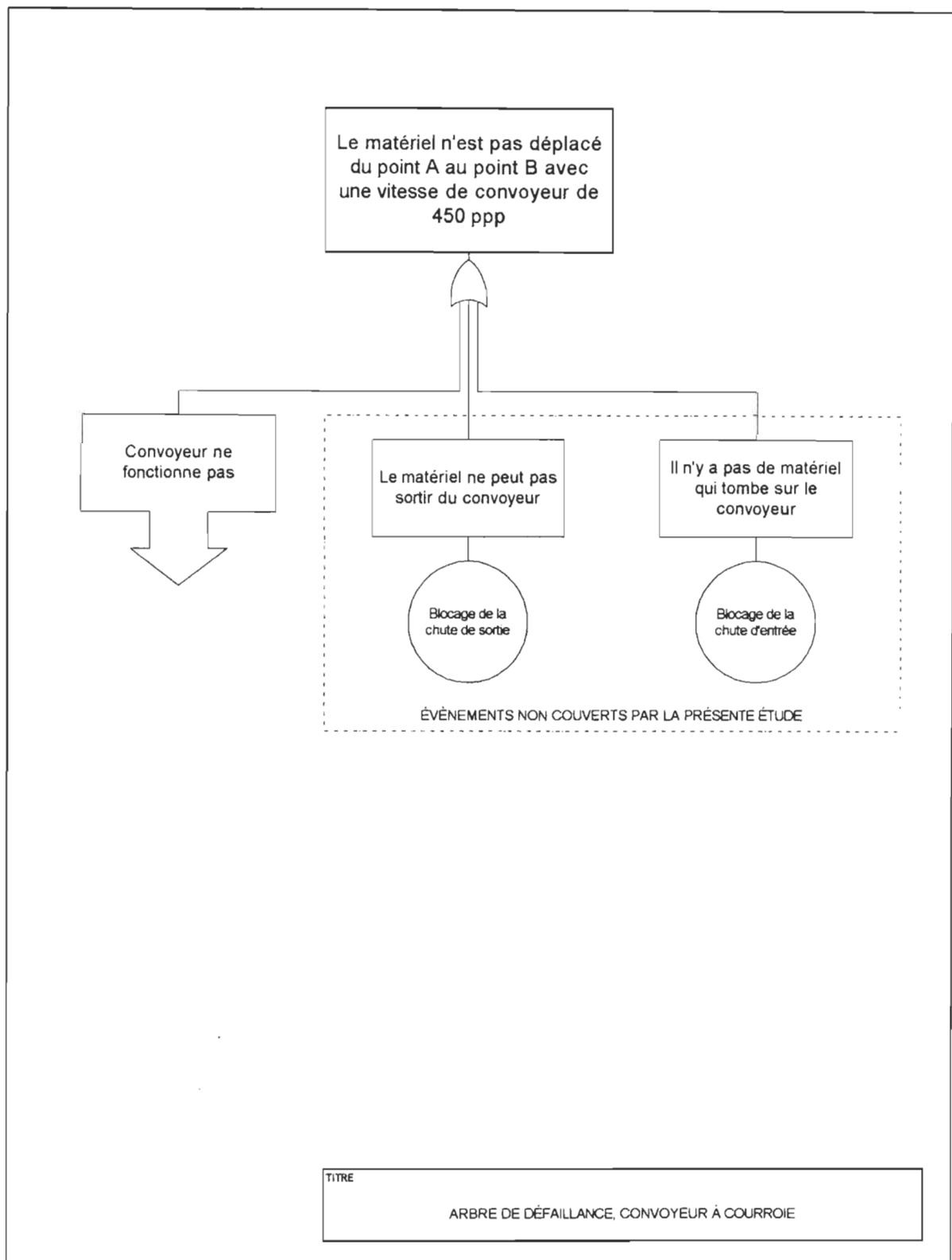
1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Courroie du convoyeur	Supporter le matériel afin de le déplacer	Usure	Réduction de la durée de vie de la courroie	Surcharge du convoyeur	
			Déchirure	Glissement entre la courroie et le tambour de tête	
			Arrêt du convoyeur	Surchauffe du système	
			Surchauffe de la courroie	Frottement d'une pièce sur la courroie	
				Mauvais alignement de la courroie	
				Mauvaise sélection des couverts	
				Rouleau porteur qui ne tourne pas	

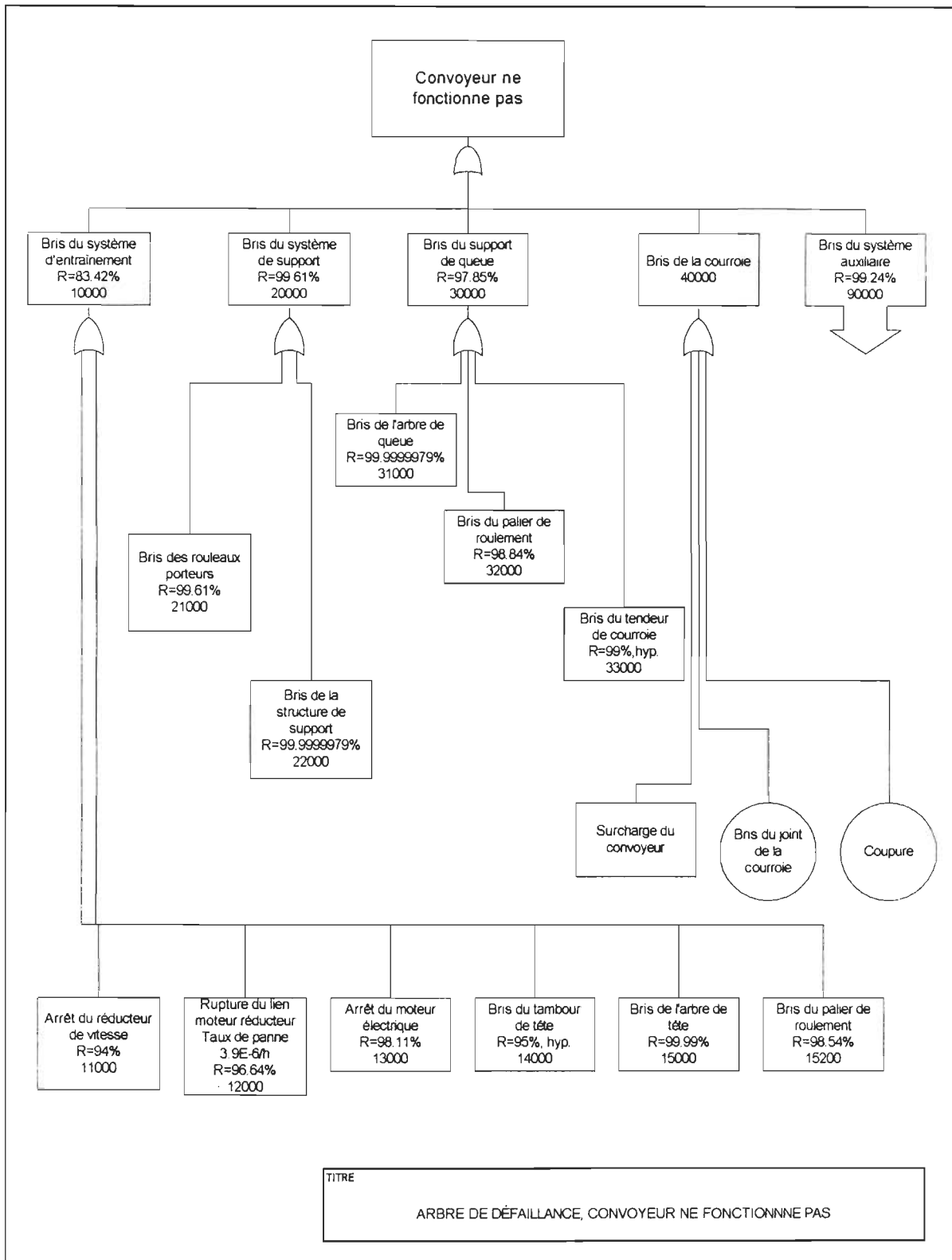
1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Courroie du convoyeur	Supporter le matériel afin de le déplacer	Abrasion	Réduction de la durée de vie de la courroie	Matériel abrasif	
				Surchauffe du système	
		Déchirure	Arrêt du convoyeur	Tension de la courroie trop importante	
			Perte de capacité du convoyeur	Surcharge du convoyeur	
				Frottement avec une pièce tranchante	
				Composantes entre un tambour et la courroie	
				Mauvais collage du joint	
				Tension de la courroie trop importante	
				Surcharge du convoyeur	
		Surchauffe	Blocage de la courroie	Glissement entre le tambour de tête et la courroie	

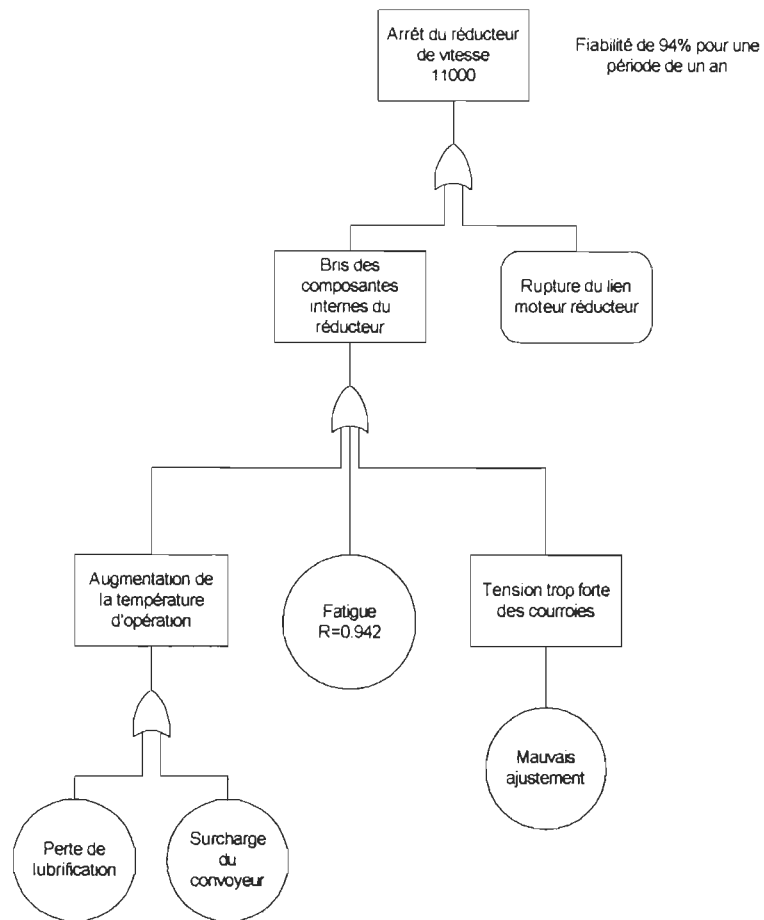
1	2	3	4	5	6
Description et n° de pièce	Fonction de la pièce	Mode de défaillance potentielle	Effet(s) potentiel(s) de défaut	Cause(s) possible(s) du défaut	Commentaires
Courroie du convoyeur	Supporter le matériel afin de le déplacer	Surchauffe	Usure prématurée	Rouleau porteur qui ne tourne pas	
		Étirement excessif	Perte de tension	Mauvaise sélection de courroie	
			Flexion importante	Surcharge du convoyeur	
			Perte de traction entre le tambour de tête et la courroie	Surchauffe du système	
		Flexion importante entre les rouleaux porteurs	Génération de poussière	Espacement entre les rouleaux porteurs trop grand	
			Vibration	Courroie trop faible	
			Usure de la courroie	Courroie usée	
			Résistance important au déplacement du matériel, perte de vitesse	Surcharge du convoyeur	

ANNEXE V

ARBRE DE DÉFAILLANCE

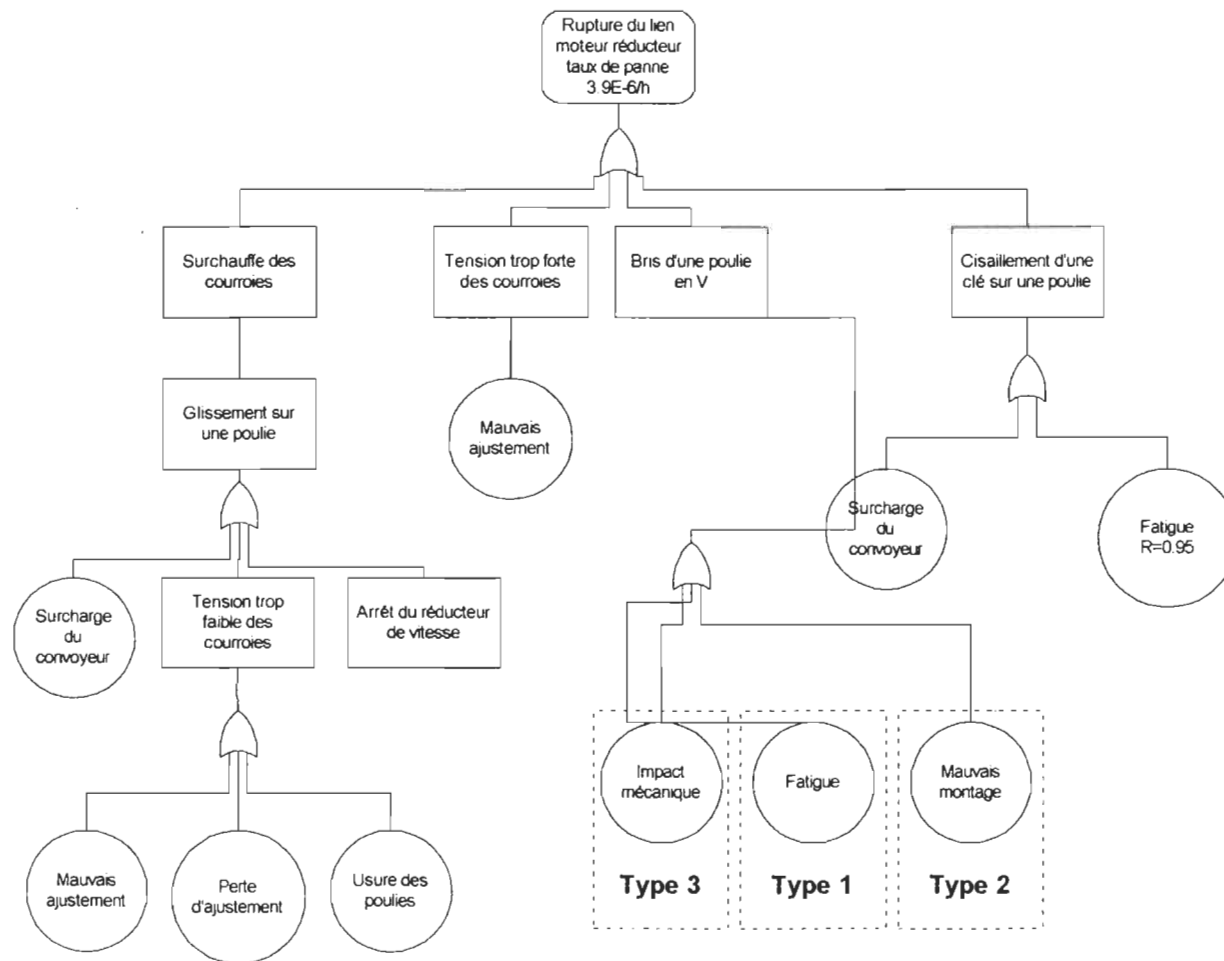






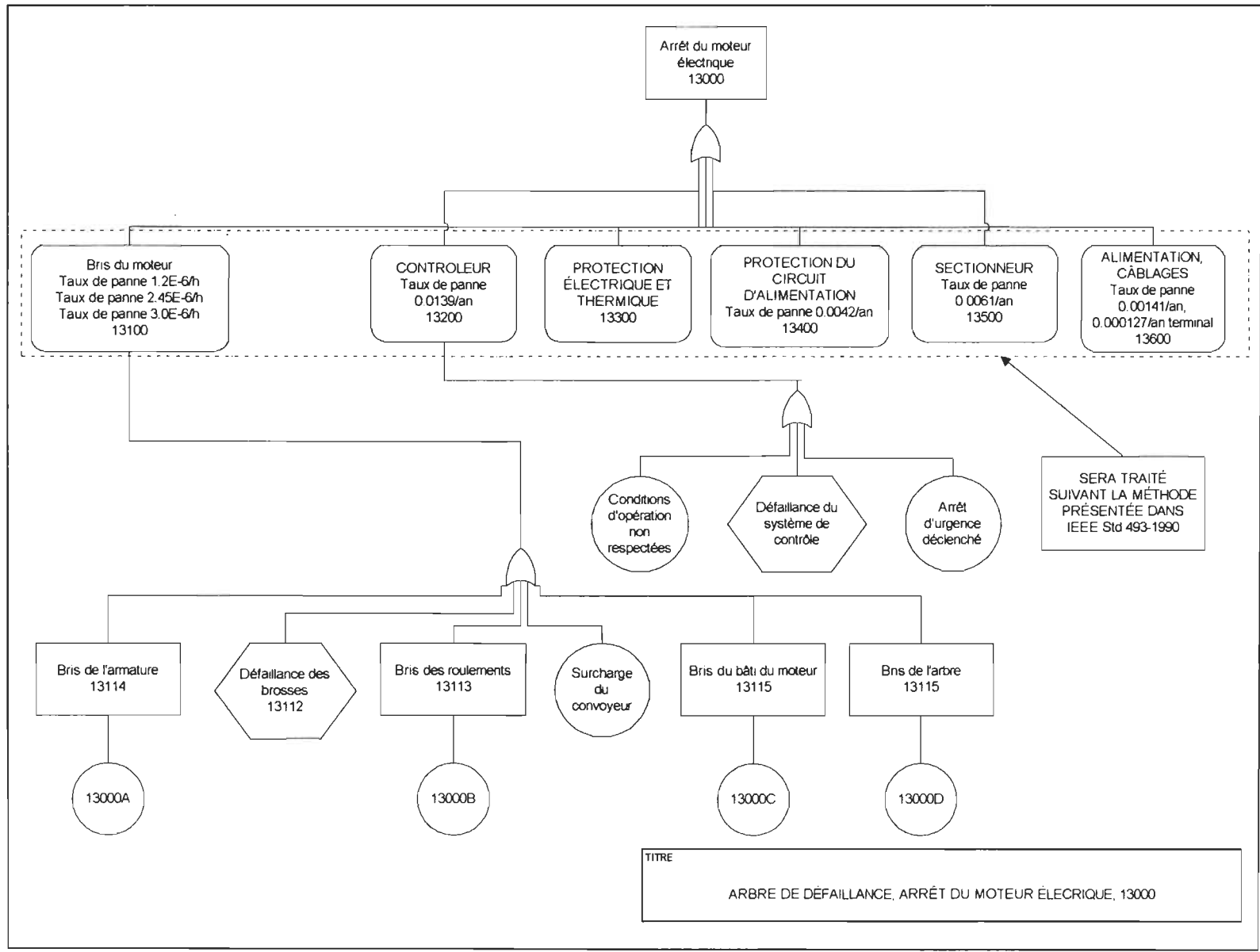
TITRE

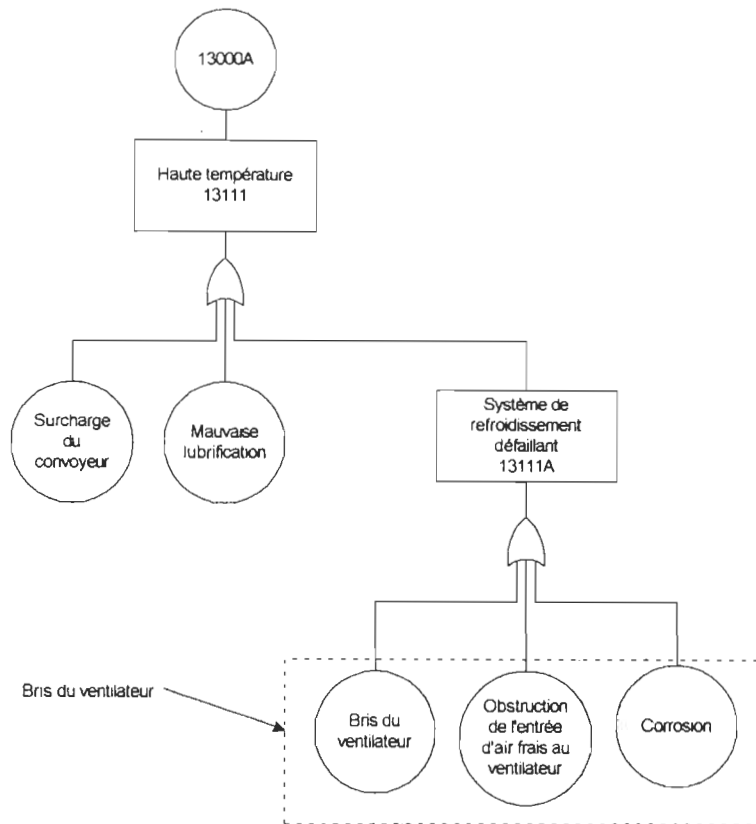
ARBRE DE DÉFAILLANCE, ARRÊT DU RÉDUCTEUR DE VITESSE
11000



TITRE

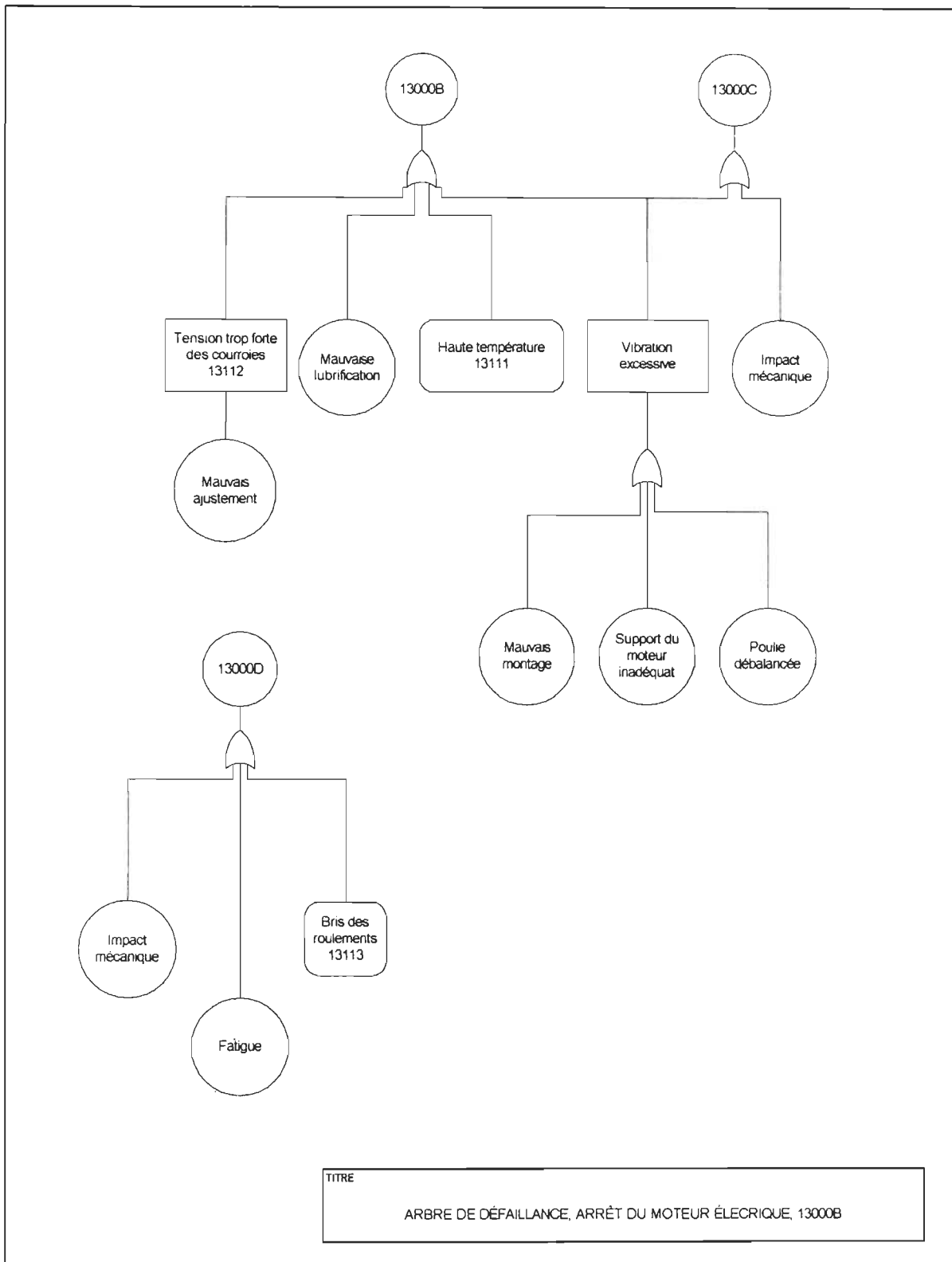
ARBRE DE DÉFAILLANCE, RUPTURE DU LIEN MOTEUR-RÉDUCTEUR, 12000

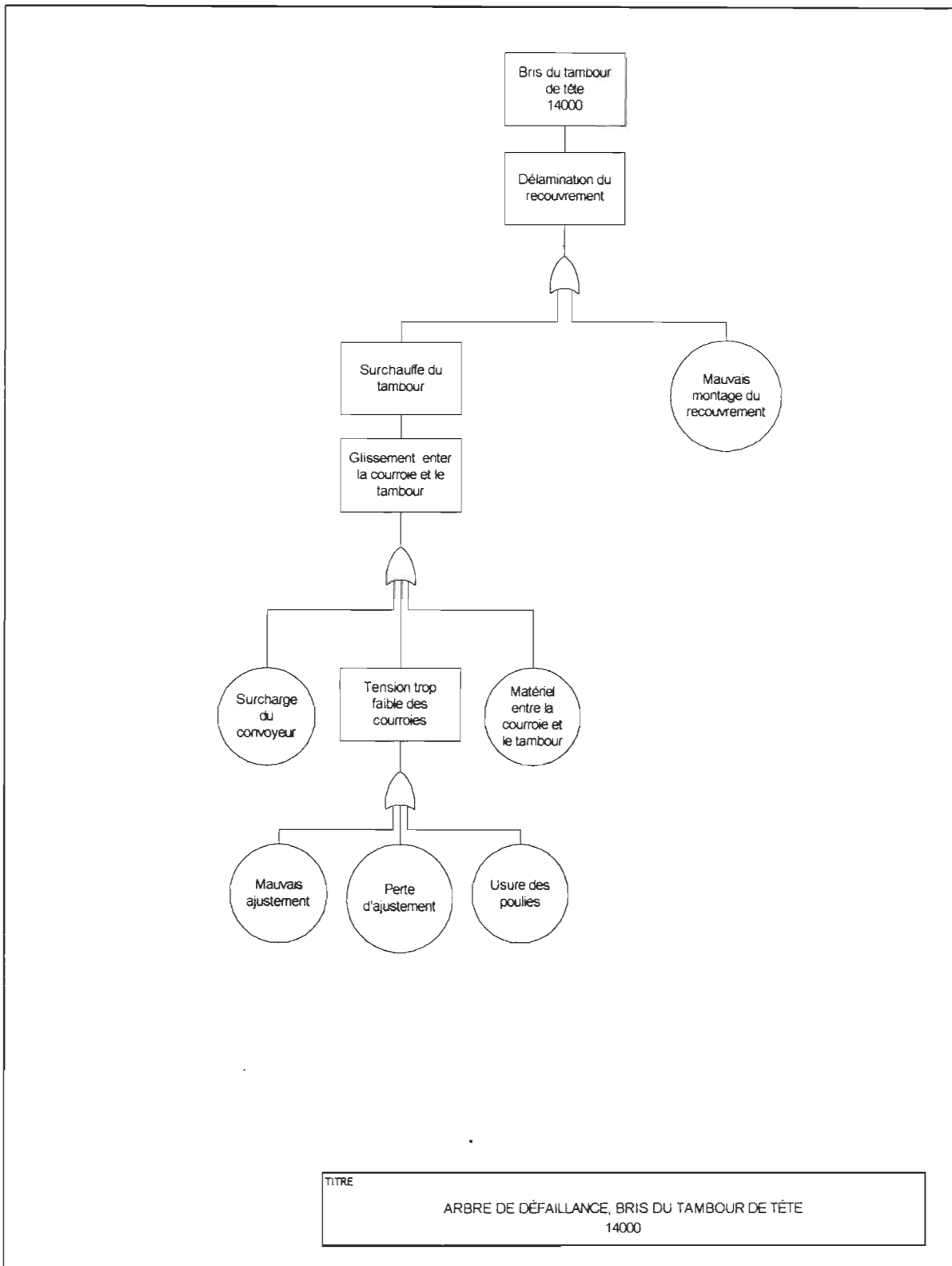


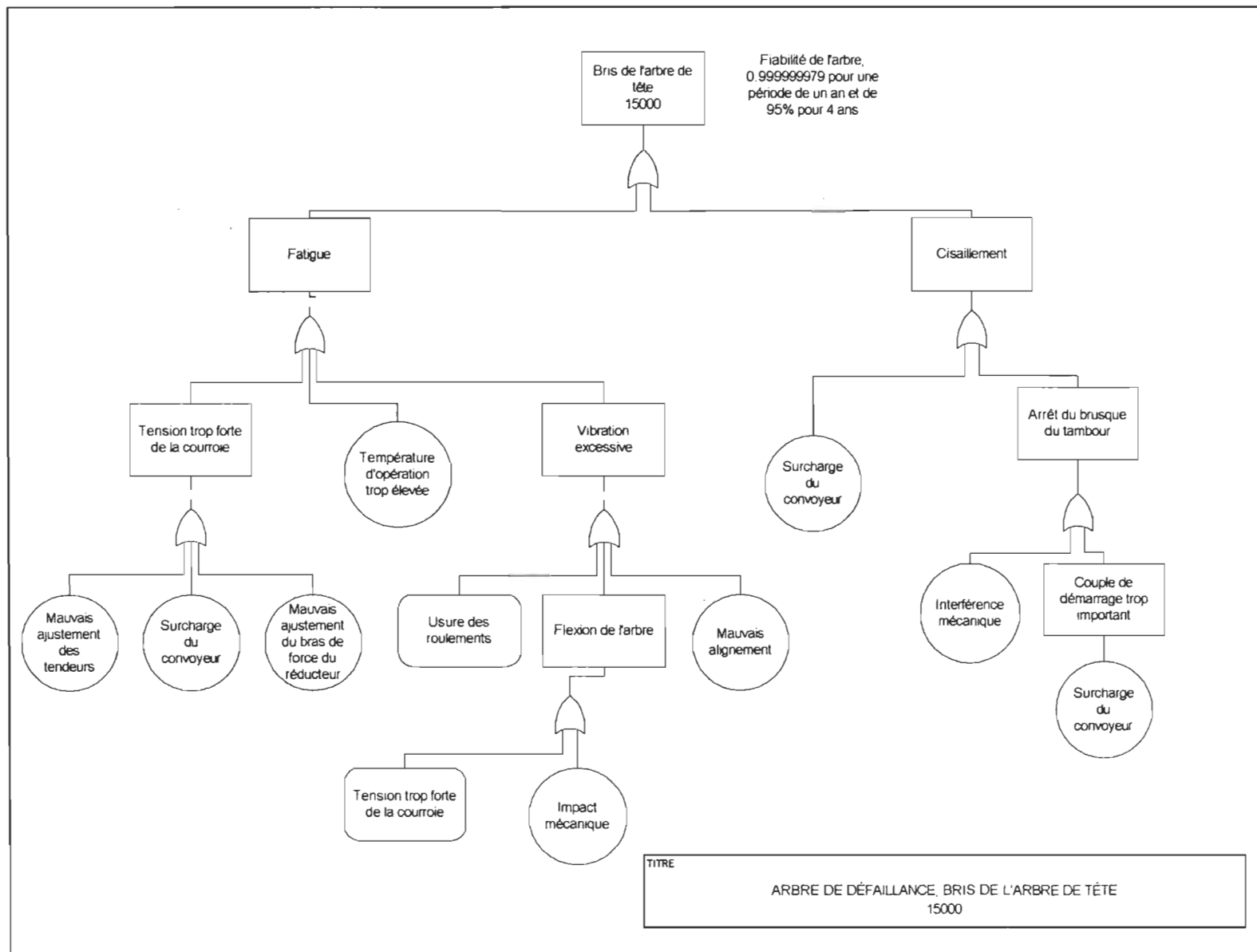


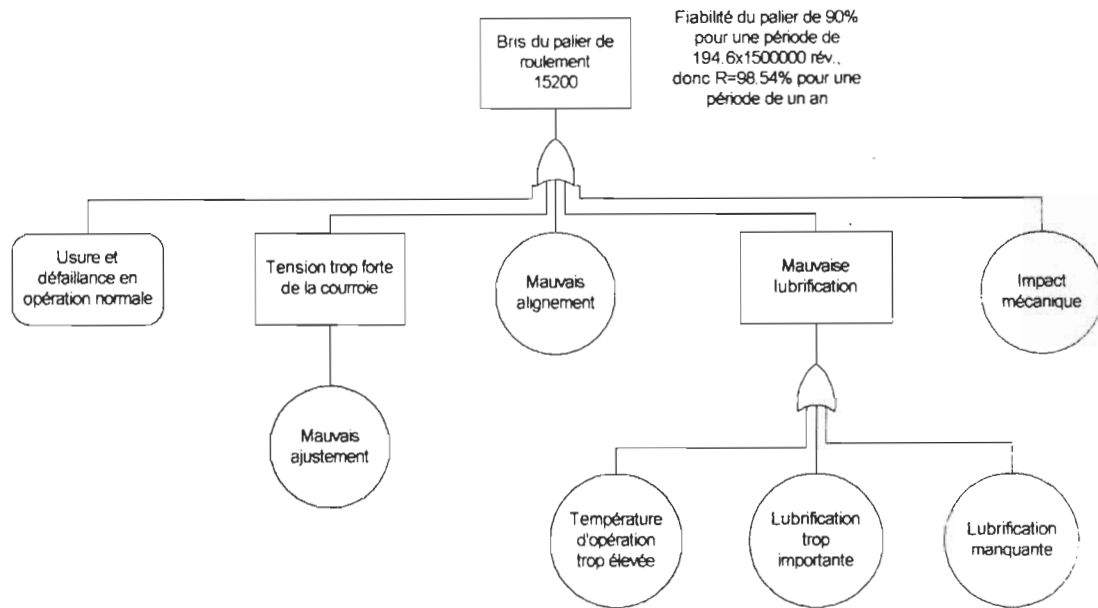
TITRE

ARBRE DE DÉFAILLANCE, ARRÊT DU MOTEUR ÉLECTRIQUE, 13000A



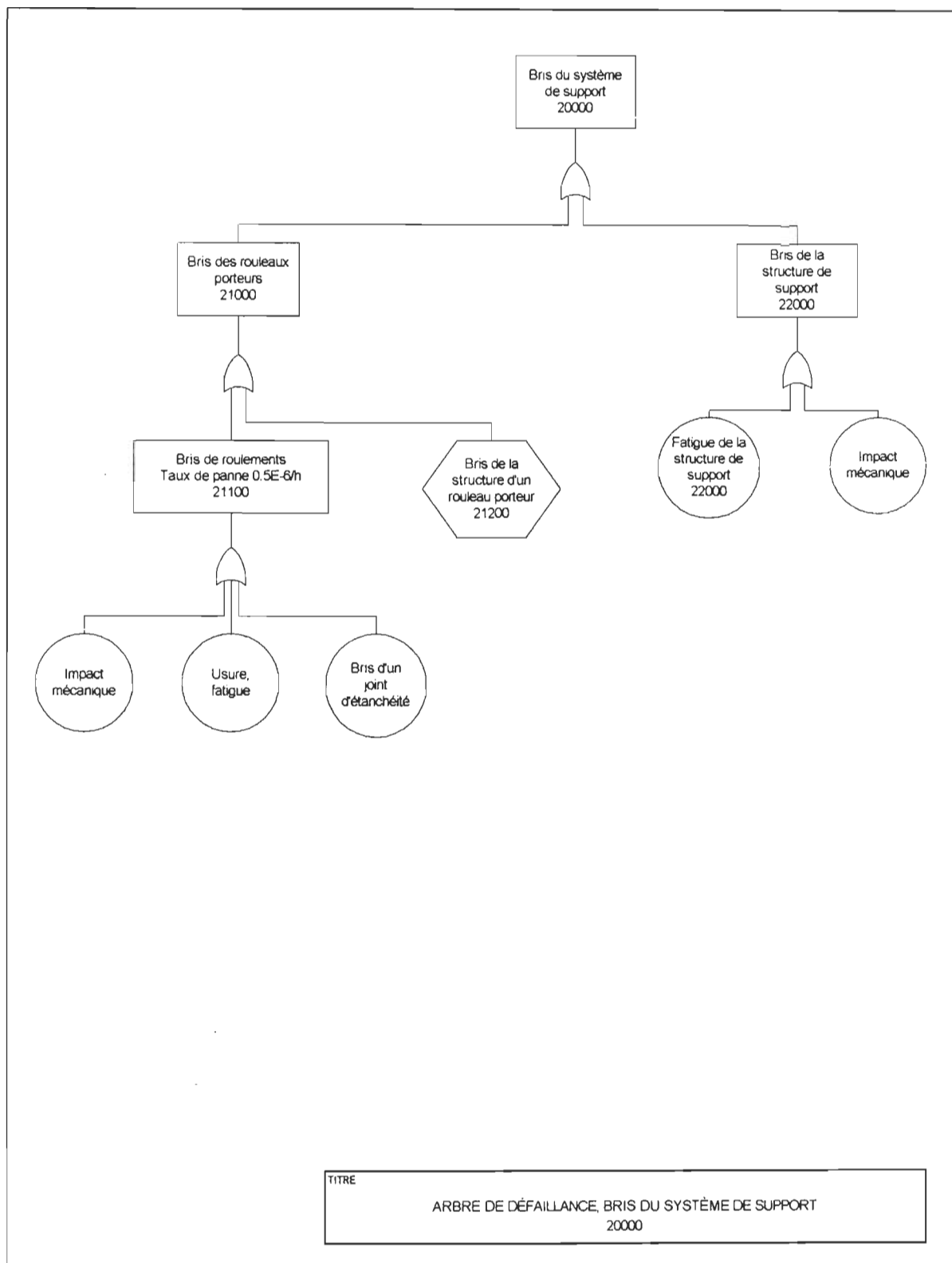


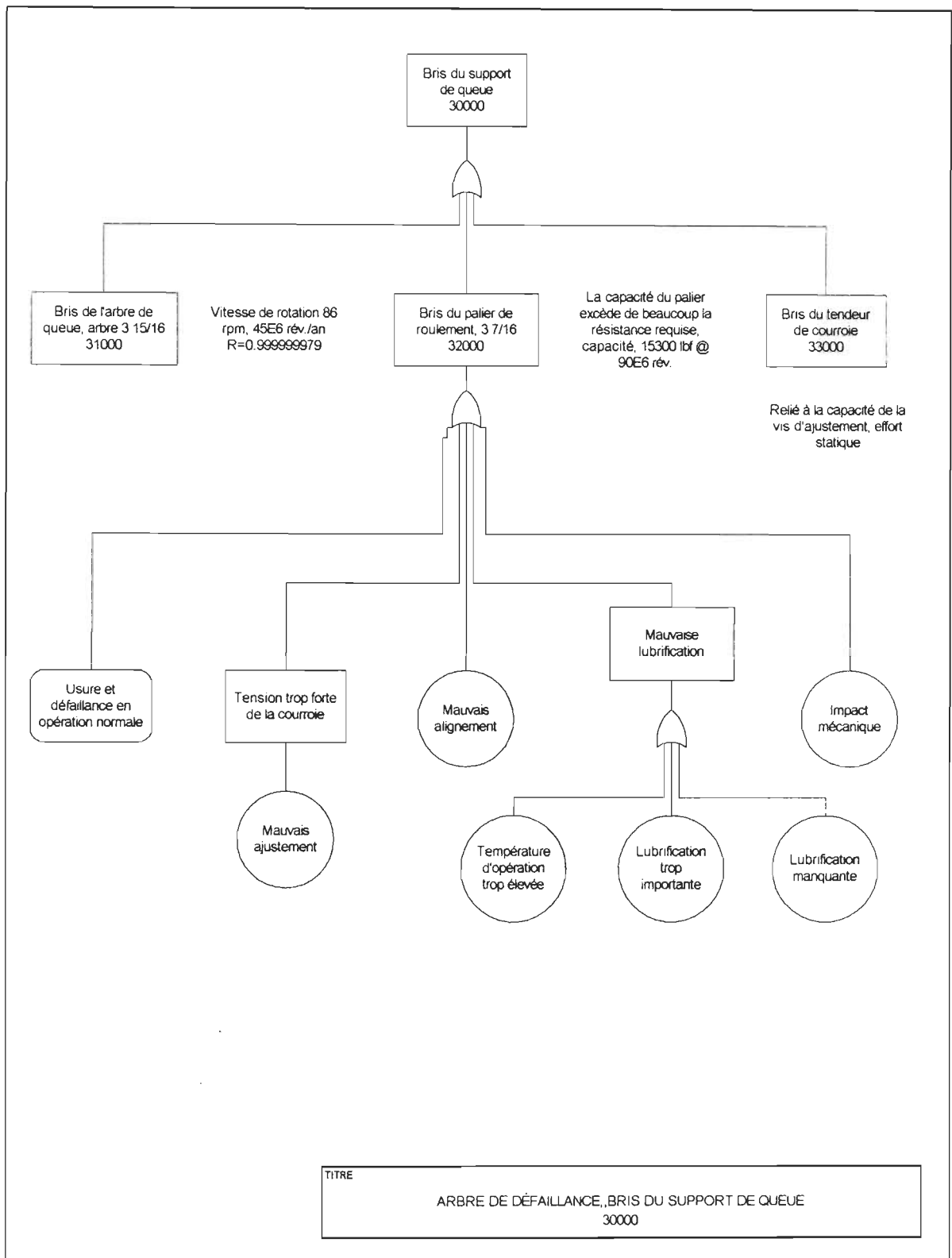


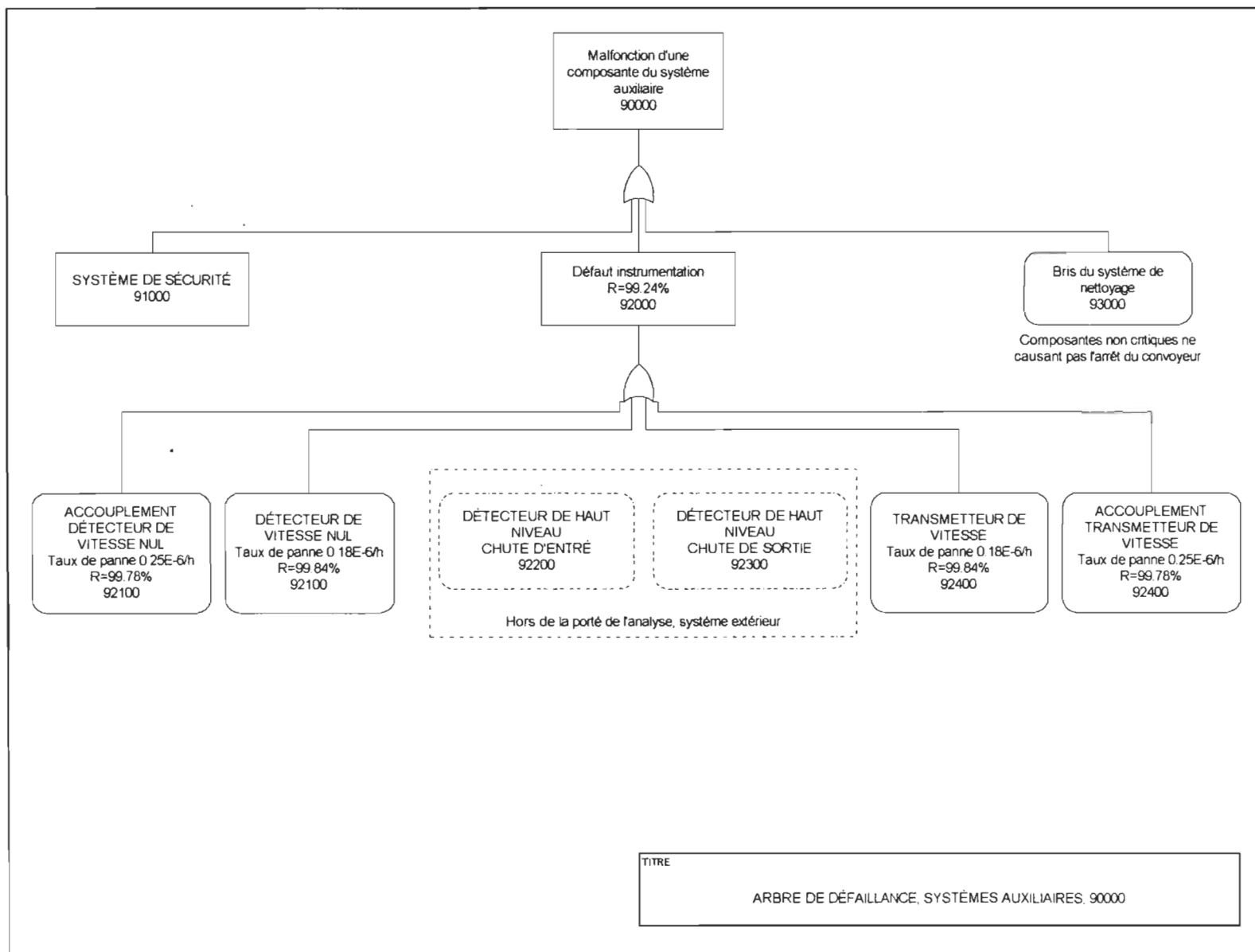


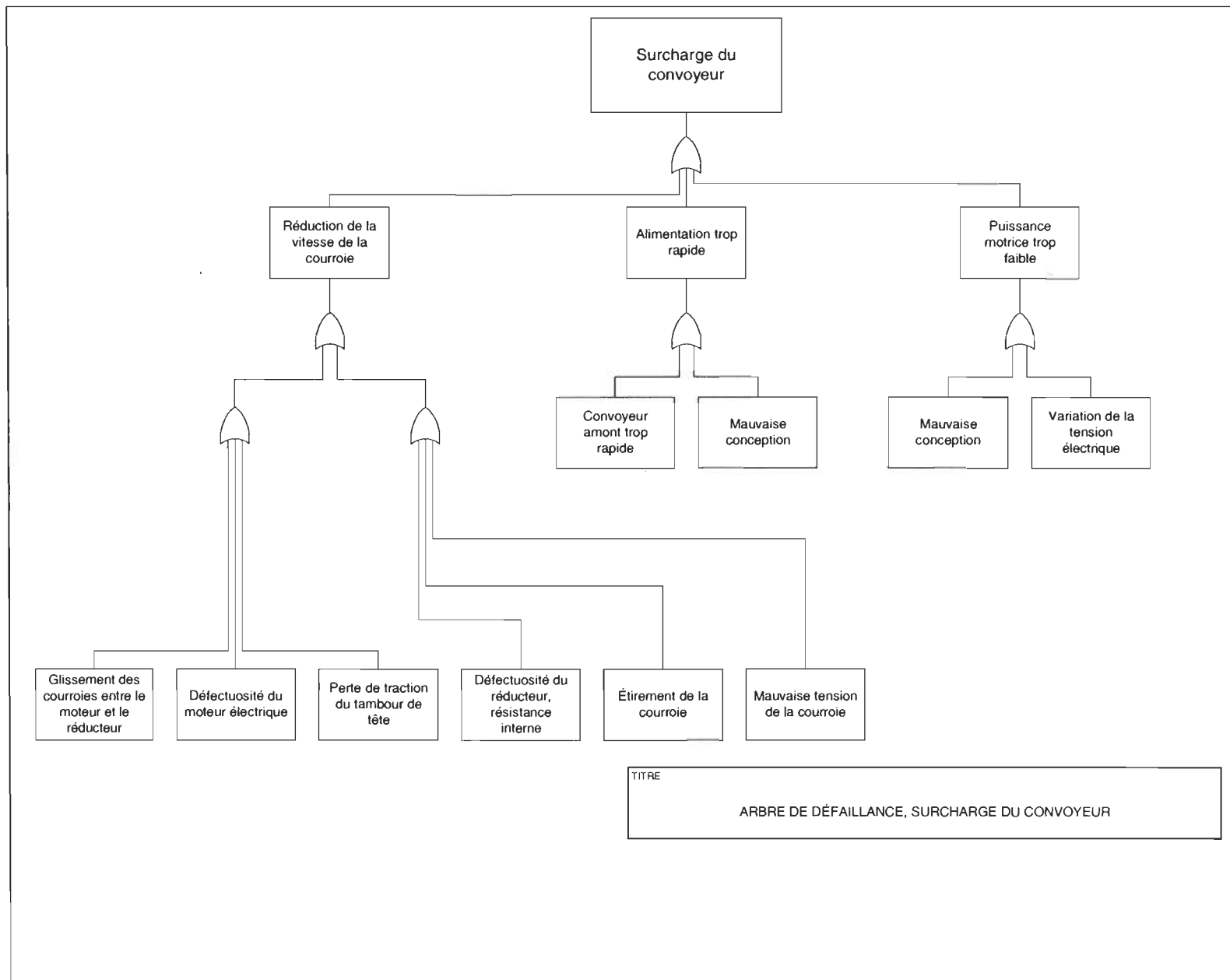
TITRE

ARBRE DE DÉFAILLANCE, BRIS DU PALIER DE ROULEMENT
15200









ANNEXE VI

FIGURE ET TABLEAU

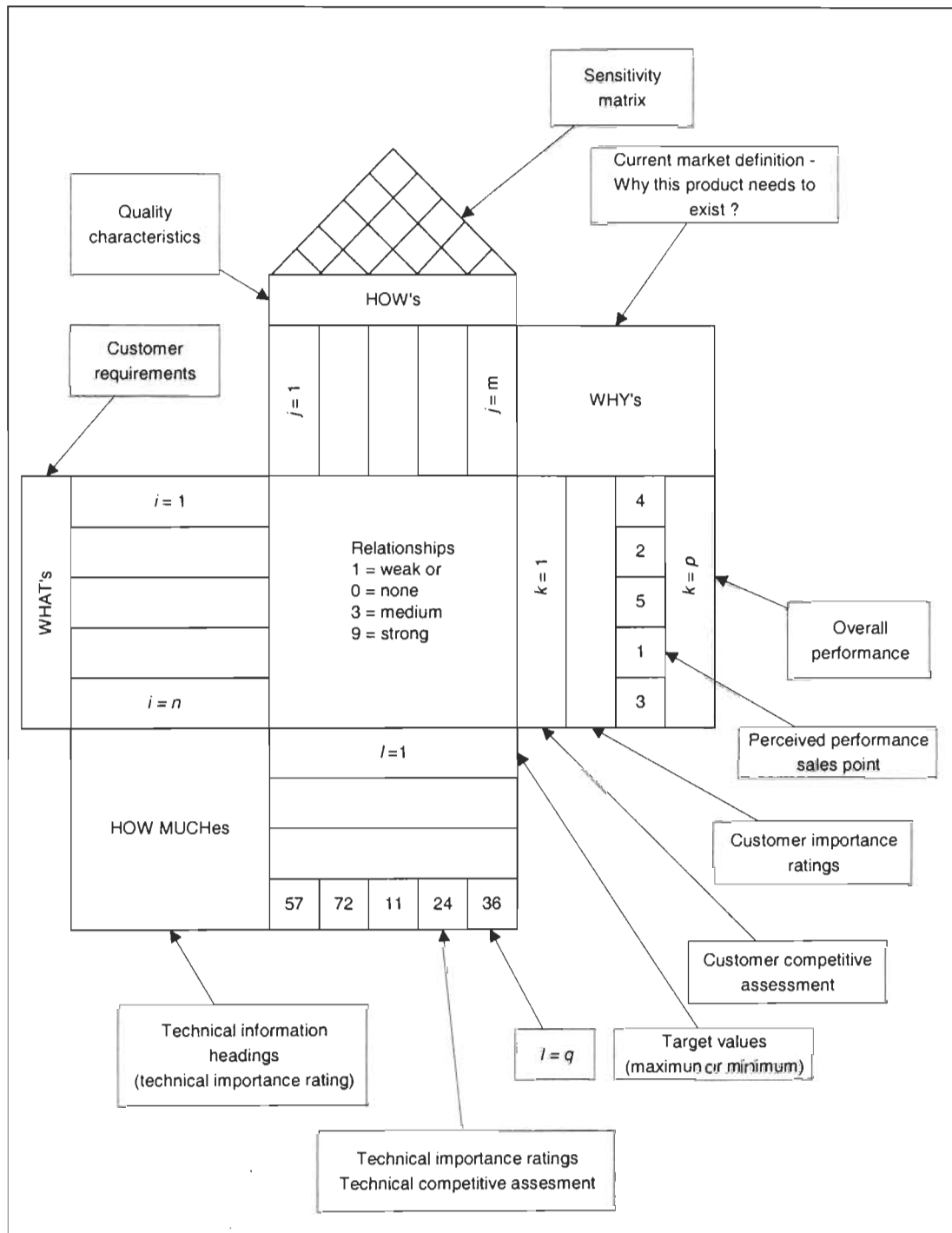


Figure VI-1 Maison de la qualité [7]

Tableau VI-1 Mots clés, analyse HAZOP

KEY HAZOP ANALYSIS GUIDE WORDS AND MEANINGS	
Guide Word/Phrase	Meaning
No	Nothing occurs (e.g. no flow)
More	Quantitative increase (e.g. higher temperature)
Less	Quantitative decrease (e.g. lower temperature)
As well as	Qualitative increase (e.g. an impurity)
Part of	Qualitative decrease (e.g. only one of the two components in the mixture)
Reverse	Opposite (backflow)
Other than	Design intent is not achieved. Something else happened